Université du Québec Institut national de la recherche scientifique Centre Énergie Matériaux & Télécommunications

Nouvelles Techniques Avancées de Modération des Effets de l'Interférence sur des Réseaux LTE Hétérogènes à Très Hauts Gains en Débits de Transmission

Par

Raouia Nasri

Thèse présentée pour l'obtention du grade de Philosophe docteur, PhD en Télécommunications

Jury d'évaluation

Directeur de recherche

Sofiène Affes **INRS-ÉMT**

Co-Directeur de recherche

Alex Stéphenne INRS-ÉMT, Ericcson Canada

Examinateur interne

Examinateur externe

Examinateur externe

Tayeb Denidni **INRS-ÉMT**

Paul Fortier Université Laval

Wessam Ajib UQAM

©Raouia Nasri, 2015

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à exprimer ma profonde reconnaissance à mon directeur de recherche Pr. Sofiène Affes. Je le remercie de m'avoir donnée l'opportunité de rejoindre son équipe de recherche, de son encadrement précieux et surtout de sa patience.

Je remercie également Dr. Alex Stéphènne qui n'a jamais épargné d'efforts pour me donner conseils.

Je remercie les membres de jury, le Pr. Tayeb Denidni, le Pr. Paul Fortier et le Pr. Ajib Wessam pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour évaluer ce travail.

Je remercie mes parents qui ne cessent de m'encourager et d'avoir confiance en moi, je leur dédie cette thèse et tout moment de joie dans ma vie. Je leur dois ce que je suis devenue aujourd'hui et jamais en saurais-je les récompenser.

Sans oublier ma petite et précieuse famille: mon mari, ma princesse Lamiss et mon héro Taym qui ont vécu avec moi chaque moment dans ce travail.

Résumé

Dans cette thèse, on étudie un système LTE afin d'évaluer sa performance et sa conformité aux exigences cités par l'UIT. Par la suite, on considère un réseau hétérogène HetNet (Heterogeneous Network) pour un système LTE à spectre partagé. Notre HetNet est composé de cellules femto à faible puissance déployées conjointement avec les cellules macro. Cette nouvelle structure en couches génère de l'interférence qui dégrade la performance du réseau. Pour résoudre ce problème dans les HetNets, on propose une stratégie d'annulation et une stratégie d'évitement de l'interférence pour la réduire au niveau de l'usager.

Pour exploiter les résultats obtenus par les deux stratégies proposées quand elles sont appliquées séparément, on applique les deux stratégies conjointement pour bénéficier de leurs avantages respectifs. La stratégie qui en résulte, MUCICA pour *Mitigation through Uncoordinated Interference Cancellation and Avoidance*, a pour objectif d'améliorer la capacité du système tout en réduisant sa complexité. D'un côté, on considère une nouvelle stratégie d'annulation d'interférence sur le lien descendant (DL-IC) qui réduit l'interférence au niveau de l'usager en optimisant son SINR reçu (signal to interference plus noise ratio). D'un autre côté, on propose une stratégie d'évitement d'interférence où les cellules macro se voient réduire leur puissance de transmission durant certaines sous-trames pour réduire l'effet de l'interférence sur le lien descendant sur les cellules macro et femto voisines. On l'appelle low-power almost blank subframes (LP-ABS). Les deux stratégies, DL-IC et LP-ABS, permettent d'améliorer, séparément, la capacité totale du système ainsi que le SINR reçu par l'usager. Quand elles sont appliquées conjointement sous la forme MUCICA, la performance est remarquablement améliorée: on obtient un gain important en termes de débit total ainsi qu'une réduction significative en termes de complexité.

Mots-clés LTE, HetNet, femtocell, macrocell, interférence, évitement, annulation, simulations, niveau lien, niveau système.

Abstract

In this thesis, we study an LTE system to evaluate its performance and its conformity to ITU requirements. Then, we consider an LTE spectrum-sharing heterogeneous network (HetNet) with low-power femtocells that are deployed jointly with macrocells. This new cell layer generates interference that degrades network performance. To mitigate this critical issue in HetNets, we proposed interference mitigation and cancellation strategies to reduce the resulting interference at the user equipment.

To go beyond the results obtained using our two proposed strategies when applied separately, we proposed to combine both interference cancellation and avoidance techniques to benefit from their respective advantages. The resulting strategy, MUCICA for Mitigation through Uncoordinated Interference Cancellation and Avoidance, aims at enhancing the overall system capacity at relatively low complexity. On one hand, we consider a new downlink interference cancellation (DL-IC) strategy for spectrum-sharing LTE (Long Term Evolution) HetNet that reduces the interference impact on users by optimizing their received signal to interference plus noise ratio (SINR). On the other hand, we propose an interference avoidance strategy with macrocells' reduced power subframes referred to as low-power almost blank subframes (LP-ABS). The latter instructs macrocells to transmit with reduced power during some specific subframes to minimize the effect of downlink interference on femtocells and neighboring macrocells. When implementing DL-IC and LP-ABS separately, system-level simulations do suggest that both global network performance and user experience in terms of total throughput and received SNR or link-level throughput, respectively, are significantly enhanced, indeed. However, much more significant gains both in performance and complexity can be achieved by combining both newly proposed DL-IC and LP-ABS interference mitigation strategies.

Keywords LTE, HetNet, femtocell, macrocell, interference, avoidance, cancellation, system level simulations, link level simulations.

Table des matières

R	emer	ciemer	\mathbf{nts}									iii
R	ésum	é										\mathbf{v}
Α	bstra	\mathbf{ct}										vii
Ta	able o	des ma	tières									ix
\mathbf{Li}	iste d	les figu	ires									xiii
\mathbf{Li}	iste d	les tab	leaux									$\mathbf{x}\mathbf{v}$
\mathbf{Li}	iste d	les abr	éviation								2	vii
1	Int r 1.1 1.2	oducti Objec Plan d	ion géné tifs et mé le la thès	lle odologie		 		 •	 	•		$egin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array}$
2	 Spé 2.1 2.2 2.3 2.4 	cificati Vers la Les ex 2.2.1 2.2.2 Archit 2.3.1 2.3.2 2.3.3 Les te 2.4.1	ions de la a technolo igences v Les exig Les exig cecture de Le résea Le résea Les inte 2.3.3.1 2.3.3.2 chnologie Les tech 2.4.1.1 2.4.1.2 2.4.1.3 Le résea 2.4.2.1 2.4.2.2	technologie LTE-Advan ie LTE			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		$\begin{array}{c} 5 \\ 5 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 10 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 14 \\ 15 \\ 15 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 19 \\ 19 \\ 21 \end{array}$
		2.4.3	Les tech	ologies d'évolution vers LTH	E-Advanced	 		 •			•	21

3	Éva	luatio	n des technologies LTE à l'aide du simulateur LTE	25
	3.1	Le sin	nulateur LTE	25
		3.1.1	Tâches effectuées et méthodologie	26
		3.1.2	Modélisation du simulateur	27
		3.1.3	Correspondance entre les niveaux lien et système	29
	3.2	Évalu	ation des technologies LTE-Advanced	30
		3.2.1	Les simulations au niveau lien	31
			3.2.1.1 Paramètres des simulations au niveau lien	31
			3.2.1.2 Résultats des simulations	32
		3.2.2	Les simulations au niveau système	32
			3.2.2.1 Résultats des simulations	33
4	\mathbf{Les}	réseau	ux hétérogènes	37
	4.1	Introd	luction aux réseaux hétérogènes	37
		4.1.1	Motivations pour les réseaux hétérogènes	38
			4.1.1.1 La demande croissante de grande capacité	38
			4.1.1.2 De la capacité spectrale à l'efficacité réseau	39
			4.1.1.3 Impact sur les revenus des opérateurs et les investisseurs	39
		4.1.2	Définition des réseaux hétérogènes	39
		4.1.3	Architecture et scénarios de déploiement des HetNets	40
		4.1.4	Aspects des réseaux hétérogènes	42
			4.1.4.1 Configuration radio des HetNets	42
			4.1.4.2 Coexistence de plusieurs couches	43
			4.1.4.3 Handover	44
			4.1.4.4 Assurance de la QoS et de la sécurité	45
			4.1.4.5 Interférence radio	45
	4.2	Aveni	ir des réseaux hétérogènes	46
	4.3	Perfor	rmance des HetNets par rapport aux réseaux homogènes	47
		4.3.1	Les cellules femto	47
			4.3.1.1 Architecture des cellules femto	48
			4.3.1.2 Auto-configuration et standardisation des cellules femto	49
			4.3.1.3 Installation des cellules femto	50
			4.3.1.4 Le contrôle d'accès	50
			4.3.1.5 Contrôle de la mobilité	51
			4.3.1.6 Les défis posés par les cellules femto	51
			4.3.1.7 L'interférence	52
		4.3.2	Évaluation des HetNets par rapport à un réseau homogène	54
		-	4.3.2.1 Introduction des cellules femto dans le simulateur LTE	54
			4.3.2.2 Évaluation des HetNets par rapport à un réseau homogène	54
5	Noi	ivelles	techniques de modération de l'interférence dans les HetNets	59
	5.1	Techn	iques de gestion de l'interférence inter-cellules dans les systèmes LTE-Advanced	60
	-	5.1.1	Alignement d'interférence	60
		5.1.2	Techniques d'évitement d'interférence	61
		5.1.3	Techniques d'annulation d'interférence	63
		5.1.4	Gestion de l'interférence dans les HetNets	64
	5.2	Propo	sition de techniques de modération de l'interférence dans les HetNets	65
		5.2.1	L'annulation d'interférence sur le lien descendant DL-IC	67

	5.2.2	La stratégie LP-ABS proposée	1
	5.2.3	Combinaison de DL-IC et LP-ABS: MUCICA	4
5.3 Évaluation des techniques proposées			
	5.3.1	Approche comparative d'évaluation	6
		5.3.1.1 FFR	6
		5.3.1.2 DL-PC	7
		5.3.1.3 $ZP-ABS$	7
		5.3.1.4 ASA	7
	5.3.2	Analyses et discussion	8
		5.3.2.1 Évaluation de la stratégie DL-IC seule	9
		5.3.2.2 Évaluation de la stratégie LP-ABS seule	6
		5.3.2.3 Évaluation des stratégies DL-IC et LP-ABS combinées: MUCICA . 8	7
			_

Références

Annexes

Liste des figures

2.1	Déroulement des travaux de IMT-Advanced	7
2.2	Évolution vers le LTE-Advanced en termes de débits crête.	9
2.3	Les éléments du réseau EPS.	11
2.4	Partage de fonctionnalités entre le EPC et l'E-UTRAN.	11
2.5	Architecture du réseau d'accès E-UTRAN	12
2.6	Modulation multi-porteuses.	16
2.7	Modulation multi-porteuses OFDMA et SC-FDMA.	17
2.8	La visualisation des modulation multi-porteuses OFDMA et SC-FDMA	18
2.9	Architecture des protocoles de l'interface radio de LTE	19
2.10	Agrégation de sous-porteuses dans le LTE-Advanced	22
3.1	Correspondance entre les niveaux lien et système	27
3.2	Modélisation du simulateur au niveau système	28
3.3	Correspondance SINR-CQI.	30
3.4	BLER en fonction du SNR pour un canal AWGN SISO	32
3.5	Débit par usager en fonction du SNR pour un canal AWGN SISO	33
4.1	Architecture d'un réseau hétérogène	40
4.2	Architecture d'une HeNB.	48
4.3	Comportement d'un réseau HetNet.	56
4.4	Performance d'un HetNet par rapport à un réseau homogène	56
5.1	Réutilisation de fréquences.	63
5.2	Techniques de eICIC dans les HetNets LTE	65
5.3	Illustration du schéma de séparation des sous-trames LP - ABS sur une période T_{ABS} .	72
5.4	Performance de DL-IC en fonction de la borne inférieure A_l pour $A_u = 10^{-2}$	81
5.5	Gain en débit de DL-IC par rapport à un réseau homogène en fonction de la borne	
	inférieure A_l avec $A_u = 10^{-2}$.	81
5.6	Performance de DL-IC en fonction de la borne supérieure A_u avec $A_l = 10^{-2}$	82
5.7	Gain en débit de DL-IC par rapport à un réseau homogène en fonction de la borne	
	supérieure A_u avec $A_l = 10^{-2}$	82
5.8	Performance de DL-IC en fonction de N_c pour différents nombre de cellules femto	
	par cellule macro	83
5.9	Performance de DL-IC et des des stratégies Benchmark en fonction du nombre de	
	cellules femto par cellule macro pour différents N_c	84
5.10	Performance de DL-IC par rapport aux stratégies <i>benchmark</i> en fonction du nombre	
	de cellules femto par cellule macro	85

5.11	Gain en débit de DL-IC et des stratégies <i>benchmark</i> en fonction du nombre de cellules	
	femto par cellule par rapport à un réeau homogène	85
5.12	Performance de LP-ABS par rapport aux stratégies <i>benchmark</i> en fonction du nombre	
	de cellules femto par cellule macro	86
5.13	Gain en débit de LP-ABS et des stratégies Benchmark en fonction du nombre de	
	cellules femto par cellule macro par rapport à un réseau homogène	87
5.14	Performance de LP-ABS comparée à DL-IC en fonction du nombre de contraintes	
	d'annulation	88
5.15	Performance de LP-ABS comparée à DL-IC en fonction du nombre de cellules femto	
	par cellule macro	89
5.16	Performance de la combinaison DL-IC et LP-ABS en fonction du nombre de contraintes	
	d'annulation.	89
5.17	Performance de la combinaison DL-IC et LP-ABS en fonction du nombre de cellules	
	femto par cellule macro.	90
5.18	Performance de la combinaison DL-IC et LP-ABS pour $N_c = 3$ par rapport à DL-IC	
	seule pour différents N_c	91

Liste des tableaux

3.1	Paramètres des simulation au niveau lien	31
3.2	Paramètres des simulations au niveau système.	33
3.3	Efficacité spectrale de la cellule en bps/Hz/cellule	34
3.4	Efficacité spectrale au bord de la cellule en bps/Hz/cellule	34
3.5	Efficacité spectrale pour évaluer la mobilité	34
4.1	Les différents nœuds des HetNets.	41
4.2	Les différents types de couplage dans un HetNet.	43
4.3	Paramètres des simulations au niveau système.	55
5.1	Correspondance entre le CQI et la puissance à soustraire dans la stratégie LP-ABS.	73
5.2	Fonctionnement de la combinaison de DL-IC et LP-ABS.	
5.3	Paramètres des simulations pour les stratégies de mitigation de l'interférence 7	
5.4	Le compromis entre le gain en complexité et le gain en débit réalisé par MUCICA	
	par rapport à DL-IC en fonction du nombre de cellule femto par cellule macro	92

Liste des abréviations

AMC	Adaptive Modulation and Coding
ARQ	Automatic Repeat Request
ASA	Adaptive Subband Allocation
CDMA	Code Division Multiple Access
CQI	Channel Quality Indicator
DL-IC	Downlink Interference Cancellation
DwPTS	Downlink Pilot Time slot
eICIC	enhanced Inter-Cell Interference Coordination
EPS	Evolved Packet System
EPC	Evolved Packet Core
E-UTRAN	Evolved UTRAN
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFR	Fractional Frequency Reuse
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunneling Protocol
HARQ	Hybrid ARQ
HLR	Home Local Register
HMS	Home NodeB Management System
HSS	Home Server Subscriber
HSPA	High Speed Packet Access
ICIC	Inter-Cell Interference Coordination
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMST	Improved Mobile Telephone Service
ISI	Inter-Symbol Interference
ITU	International Telecommunications Union
LP-ABS	Low Power Almost Blank Subframe
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control

MCS	Modulation and Coding Scheme
MISO	Multiple Input Single Output
MME	Mobility Management Entity
NTP	Network Time Protocol
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Multiple Access
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PLMN ID	Public Land Mobile Network IDentificator
P-GW	PDN Gateway
PRBs	Physical Resource blocks
RAN	Radio Access Network
RLC	Radio Link Control
ROI	Region of Interest
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SDMA	Spatial Division Multiple Access
S-GW	Serving Gateway
SIMO	Single Input Mutiple Output
SNR	Signal-to-Noise ratio
SONs	Self-optimizing Networks
TAC	Tracking Area Code
TDMA	Time Division Multiple Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
UpPTS	Uplink Pilot Time slot
WAN	wide area network
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access mobile
3GPP	3rd Generation Partner Project

Chapitre 1

Introduction générale

Dans les dernières décennies, les communications mobiles n'ont cessé de s'accroitre. Cette évolution rapide des technologies des communications revient à la demande croissante de nouveaux services et l'expansion continuelle du marché avec un développement compétitif des équipements mobiles intelligents. De plus, la croissance du nombre d'usagers mobile et leur exigence en termes de qualité de service et de sa variété constitue un défi réel que doivent considérer les systèmes de communications existants. En effet, les systèmes de communications mobiles doivent supporter la coexistence de divers types d'applications exigeantes en termes de qualité de service requises. Ces facteurs réunis demandent une grande capacité et un débit de données élevé d'où le développement de nouveaux standards et technologies basés sur l'échange de données.

Cette croissance importante et continuelle impose une forte demande en ressources et oblige les systèmes cellulaires actuels à assurer une grande efficacité spectrale ce qui, en présence de rares ressources radio, exige le recours à de nouvelles techniques robustes d'allocation et de gestion du spectre disponible. C'est dans cette direction que l'ITU (International Telecommunication Union) intervient pour spécifier les critères qu'une nouvelle technologie doit satisfaire afin de suivre la tendance du marché et les attentes des usagers. Ces critères ont été définis par l'IMT (*International Mobile Telecommunication*) pour inciter à proposer de nouvelles technologies et standards permettant d'améliorer les technologies existantes et de s'adapter à la demande croissante en termes de qualité de service des communications radio mobile, d'où la proposition des technologies 3GPP/LTE et WiMAX. Ces technologies ont été évaluées par des groupes d'évaluation dont on faisait partie afin de montrer leur conformité aux exigences de l'ITU. Les études menées par chacun des groupes

ont montré que les interfaces proposées satisfaisaient les critères dictés par l'organisme ITU.

Une fois validées, des technologies doivent introduire de nouvelles stratégies et techniques afin de suivre l'évolution des communications mobiles. Dans notre étude, on se concentre sur la technologie 3GPP/LTE vue sa capacité à répondre aux exigences mais aussi en considérant la tendance de l'industrie qui a opté pour LTE.

Le majeur défi dans cette démarche est l'exploitation des ressources radio qui sont rares et qui affectent la performance du système. Pour faire face à ces problèmes, la solution consiste à opérer autrement au niveau de la gestion des ressources radio afin de définir des scénarios de réutilisation efficaces. Parmi ces solutions, on cite en premier l'expansion de la taille des cellules afin d'élargir la portée et ainsi augmenter la capacité [1]. L'idée clé était d'introduire des cellules de petites portée au sein des macrocellules. Ces cellules permettent de couvrir les trous de couverture et augmenter la capacité globale du système.

Notre approche pour augmenter la capacité repose sur l'implémentation des cellules femto [34] au sein du système comportant des macrocellules: on parle alors de réseau hétérogène ou HetNet (*Heterogeneous Network*). Cette solution parvient à améliorer la capacité des systèmes existants et surtout pour les usagers se trouvant sur les bords de la cellule. Cependant, l'ajout de ces entités ne passe pas sans inconvénients; les HetNets sont sujets à de nouveaux scénarios d'interférence faisant intervenir les cellules macro et les cellules femto. En effet, la nature ad-hoc de l'installation des cellules femto ne permet pas de prédire le comportement des interférants; d'où l'inefficacité des techniques existantes. De nouvelles stratégies de gestion des ressources ont été proposées par 3GPP/LTE et d'autres ont été développées afin de contrer cette lacune.

Dans notre cas, on a proposé des techniques d'évitement et d'annulation de l'interférence sur le lien descendant de notre système LTE afin de réduire l'interférence reçue par l'usager et améliorer son SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio).

1.1 Objectifs et méthodologie

Dans ce travail, on a considéré un HetNet pour un système LTE. Notre objectif était de développer des stratégies de gestion de l'interférence au niveau du récepteur en assurant un compromis entre la robustesse de la technique et sa complexité.

Notre étude a commencé par évaluer la technologie LTE en tant qu'interface radio proposée par le

groupe 3GPP afin de répondre aux exigences de *IMT-Advanced*. Nous faisons partie du *Canadian Evaluation Group* (CEG), sous l'auspice d'*Industrie Canada*, qui était l'un des groupes mandatés à l'échelle international pour valider la technologie LTE.

Pour réaliser notre travail, on a considéré une plateforme composée d'un simulateur au niveau lien et d'un simulateur au niveau système qui interagissent afin d'abstraire les éléments d'un scénario se rapprochant le plus de la réalité. Les résultats obtenus par le simulateur au niveau lien, qui étudie le comportement d'un lien entre un seul émetteur et un seul récepteur, sont injectés dans le simulateur au niveau système pour élargir l'étude à un environnement multi-cellules multi-usagers.

Une fois cette plateforme prête, on est capable de mener toute étude concernant les systèmes LTE. Elle nous a servi pour implémenter nos stratégies de modération de l'interférence.

Tout au long de notre étude, on a suivi une démarche progressive. On a d'abord, commencé par étudier notre stratégie d'annulation de l'interférence puis notre stratégie d'évitement d'interférence en utilisant une approche comparative avec des techniques de mitigation de l'interférence existantes. Ensuite on a travaillé sur l'amélioration de notre système en cherchant une issue pour profiter des avantages de nos deux propositions en comblant leurs inconvénients. Enfin, une combinaison des deux stratégies proposées a été considérée.

1.2 Plan de la thèse

Dans cette thèse, on a choisi de présenter les résultats des simulations à la fin de chaque chapitre selon la structure suivante:

 \succ après un chapitre introductif où on positionne l'évolution vers la technologie LTE, on étudie dans le chapitre 2, les technologies LTE,

 \succ dans le chapitre 3, on présente notre plateforme d'étude, le simulateur LTE et la validation de la technologie LTE dans le cadre du CEG (*Canadian Evaluation Group*),

 \succ dans le chapitre 4, on présente les HetNets et leur avantages par rapport à un réseau homogène, puis on démontre leur efficacité via des simulations au niveau système,

 \succ le chapitre 5 est réservé à l'étude et la proposition des techniques de gestion de l'interférence dans les HetNets LTE.

Chapitre 2

Spécifications de la technologie LTE-Advanced

Dans ce travail, on s'intéresse à améliorer la performance des réseaux HetNets de LTE. Pour ce faire, on commence par valider la performance de la technologie LTE afin d'autoriser son déploiement. Cette tâche a été effectuée au sein du CEG pour étudier la conformité de LTE par rapport aux exigences imposées par l'UIT. Dans ce chapitre, on présente brièvement le contexte historique de l'apparition de LTE et ses spécifications.

2.1 Vers la technologie LTE

Les technologies LTE ont été initiées par le 3GPP dans le cadre de l'évolution des technologies existantes afin d'améliorer leurs performances. LTE est arrivée sur le marché suite à plusieurs étapes précédant sa normalisation. En effet, LTE découle du standard UMTS qui a subit plusieurs évolutions afin de répondre aux exigences de IMT ce qui a donné naissance à LTE. Les gains réalisés avec l'UMTS étaient très prometteurs; du coup le maintien de la continuité et de l'évolution de cette technologie s'impose aussi bien à court terme qu'à long terme. Dans ce sens, le 3GPP a organisé un atelier en novembre 2004 pour étudier l'évolution de l'UMTS sur dix ans [5]. Ainsi, une nouvelle norme est étudiée au 3GPP en janvier 2005 pour en finir avec les principes fondamentaux en septembre 2006. En mars 2008, l'UIT-R a lancé un appel pour présenter les candidatures de propositions de nouvelles technologies d'interfaces radio avec un délai de soumission pour Octobre 2009. Ensuite, pour valider les solutions proposées, des groupes ont été formés pour évaluer si les propositions étaient conformes aux exigences de l'UIT. Le rapport d'évaluation des résultats de tous les groupes devait être soumis en Juin 2010. LTE est devenue une réalité en décembre 2008 où on a validé la première version des spécifications pour faire du LTE la *Release 8* du 3GPP. On parle alors de la quatrième étape des travaux d'évolution des réseaux mobiles, d'où l'appellation 4G. Comme toute génération, LTE vise à améliorer l'interface d'accès radio vers des capacités accrues, une latence réduite et une technologie d'accès radio par paquets optimisée. Pour réaliser ces objectifs, il a fallu intervenir au niveau de l'interface d'accès radio et de l'architecture du réseau d'accès pour:

- supporter une bande passante flexible allant jusqu'à 20 MHz sur les liaisons montante et descendante,
- augmenter le débit crête,
- augmenter les débits sur les bords des cellules pour les mêmes topologies de réseaux existants,
- améliorer l'efficacité spectrale,
- assurer l'interopérabilité avec des systèmes non spécifiés par le 3GPP.

Pour passer au LTE, les travaux du 3GPP étaient en premier lieu initiés pour des motifs commerciaux et concurrentiels. En effet, l'émergence du WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access mobile*) normalisé par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) visait à conquérir le marché mobile. WiMAX normalisé sous IEEE802.16e offre des capacités supérieures à celles de l'UMTS et du HSPA, ce qui constitue une menace pour le 3GPP qui devait alors réagir à cette démarche et débutait alors en 2005 les études sur LTE. L'émergence de LTE est liée à plusieurs facteurs techniques concernant principalement l'augmenation de la capacité, la diminution de la latence, l'adaptation du spectre et le déploiement de nouvelles techniques telles que l'OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Étant donné que les progrès technologiques se succèdent sans cesse, de nouveaux types d'usages s'imposent nécessitant ainsi une plus grande capacité et une évolution des technologies existantes pour accompagner ces besoins grandissants. Assurer une plus grande capacité résulte en des débits plus élevés qui dépendent des conditions radio de l'équipement terminal, de sa position dans la cellule, des techniques de transmission employées et de la disponibilité du spectre de ressources fréquentielles. Les systèmes LTE à déployer doivent assurer une latence faible autant au plan de contrôle, c'est-à-dire le temps nécessaire pour établir une connexion et accéder au service, qu'au plan usager, c'est à dire le délai de transmission d'un paquet sur le réseau si la connexion est établie. Un autre objectif indispensable: utiliser un spectre agile en fréquences capable de supporter des allocations spectrales variées. Cet objectif est consolidé par l'introduction de l'OFDM qui assure la manipulation de spectres de fréquences variables et larges. L'OFDM offre à LTE une immunité contre les interférences entre symboles et assure le partage de ressources entre des usagers avec des débits variés.

En Octobre 2010, l'UIT a tranché que LTE-Advanced de 3GPP et le IEEE 802.16m ont été retenues comme les deux technologies répondant aux exigences de *IMT-Advanced* [6]. La figure ci-contre schématise les étapes de développement des technologies de *IMT-Advanced* proposées par le 3GPP. Dans ce chapitre, on présente les principales exigences que LTE doit satisfaire et les caractéristiques



Figure 2.1 – Déroulement des travaux de IMT-Advanced.

techniques nécessaires pour y arriver.

2.2 Les exigences vis-à-vis des nouvelles technologies

L'UIT a suggéré la proposition de nouvelles technologies d'accès radio qui répondent à un nombre d'exigences. Ces exigences ont été présentées dans des rapports constituant une référence pour définir les nouvelles interfaces d'accès radio d'une part et pour valider la conformité, par des groupes d'évaluateurs d'une autre part. LTE a été spécifiée pour la première fois dans la *release* 8 des travaux de 3GPP. LTE présente alors une nouvelle technique d'accès radio basée sur OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) sur la liaison descendante et le SC-FDMA (Single-Carrier Frequency Division Multiple Access) sur la liaison montante. Le défit majeur face à LTE est d'assurer des performances dépassant celles des technologies précédentes en termes de débits, de mobilité élevée et de coûts réduits.

Dans ce qui suit, on présente les attentes vis-à-vis des nouvelles technologies d'accès radio.

2.2.1 Les exigences de IMT-Advanced de l'UIT

IMT-Advanced a spécifié un nombre de contraintes que devait satisfaire toute nouvelle technologie radio de troisième génération et plus. Les principaux exigences et éléments avancés par le *IMT-Advanced* sont particulièrement [7]:

- des efficacités spectrales et des pics de débits plus élevés,
- des latences réduites pour favoriser des applications sensibles aux délais,
- des mobilités élevées supportées dans les environnements suivants:
 - un environnement stationnaire pour les applications fixes,
 - un environnement pédestre avec des vitesses allant jusqu'à 10 kmph,
 - un environnement véhicule typique avec des vitesses allant jusqu'à 120 kmph,
 - un environnement véhicule à grandes vitesses allant jusqu'à 500 kmph,
 - $\circ\,$ des environnements avec des mobilités faibles.
- supporter des cellules de taille plus grande et améliorer les performances au bord des cellules,
- des coûts et une complexité réduits au niveau des terminaux,
- une interface usager mobile,
- un accès universel,
- amélioration des services de diffusion,
- assurance de la coexistence des réseaux PAN/LAN/WAN avec une compatibilité de services,
- capacité d'itinérance universelle,
- des services mobiles de haute qualité.

Ces exigences constituent des objectifs que chaque nouvelle technologie devrait atteindre. Le défi des technologies de 4G est d'obtenir des crêtes de débits aussi important que 1 Gbps pour les applications en faible mobilité et 100 Mbps pour celles à de grande vitesse. Les technologies de 4G doivent assurer une meilleure performance en termes de débits, de latence, d'efficacité spectrale mais aussi une meilleure gestion de la complexité des terminaux en supportant différents protocoles et standards. Ce-ci dit, le LTE doit assurer un ensemble de services continus avec une qualité élevée tels que la vidéo, la vidéo-conférence et la navigation web. L'usager doit bénéficier d'une expérience dite *Always-on* lui permettant d'être capable d'accéder aux services offerts à tout moment désiré. Cette caractéristique ajoute une contrainte sur la consommation d'énergie d'où l'utilité d'avoir des équipements, mais aussi des techniques, capables de bien gérer l'autonomie de la batterie. Ces contraintes en termes de performance imposent des exigences d'ordre techniques qu'on présentera plus tard. La figure 2.2 illustre l'évolution vers le LTE et l'amélioration qui en découle en termes de débits crêtes.



Figure 2.2 – Évolution vers le LTE-Advanced en termes de débits crête.

2.2.2 Les exigences du LTE-Advanced

Après avoir présenté le LTE durant la *Release* 8, 3GPP se lance dans son évolution pour le LTE-Advanced de 4G et spécifie les exigences pour compléter cette étape. Les exigences sont définies dans le rapport (TR) 36.913 [8] et répondent aux exigences de *IMT-Advanced* mais aussi à celles définies par le groupe 3GPP lui-même pour assurer l'avancement et le développement de LTE. Les considérations techniques majeures sont:

- la continuité des travaux pour améliorer l'architecture et les technologies radio de LTE,
- la définition de scénarios et d'exigences de la coexistence et l'interopérabilité avec les technologies existantes,
- l'assurance de la compatibilité entre LTE et LTE-Advanced: les réseaux LTE doivent supporter les terminaux LTE-Advanced et vice-versa,
- l'accomodement des canaux dédiés à des allocations de 20 MHz dans le LTE-Advanced avec les spectres de fréquences disponibles.

3GPP a identifié sa plateforme de proposition en fixant ses propres exigences qui dépassaient celles exigées par IMT et les techniques de l'interface radio candidate. Cette plateforme présente des travaux aux niveaux des techniques, des protocoles et des architectures qu'on détaillera dans ce qui suit.

2.3 Architecture des systèmes LTE

Le passage de l'UMTS vers le LTE comprend l'évolution du réseau d'accès et du réseau coeur en définissant de nouveaux blocs comme l'EPS (*Evolved Packet System*), l'EPC (*Evolved Packet Core*) et l'E-UTRAN (*Evolved*) UTRAN. Le SAE comprend l'*Evolved Packet System* (EPS) qui assure le transport des paquets IP vers l'usager. L'EPS permet l'accès à Internet ainsi qu'aux services de voix sur IP, VoIP. Pour ce faire, un EPS est associé à un porteur ou *bearer* qui assure une certaine qualité de service. Ainsi, chaque usager peut avoir un ou plusieurs *bearers* dépendamment de la nature des services qu'il utilise, par exemple il peut être connecté à Internet pour effectuer un téléchargement et passer un appel VoIP en même temps. La figure suivante schématise les différentes composantes de l'architecture d'un EPS. Cette figure montre l'architecture générale avec les éléments du réseau et les différentes interfaces standardisées. Le réseau est formé d'un réseau d'accès E-UTRAN composé d'un seul nœud, l'evolved NodeB, et d'un réseau cœur avec plusieurs entités. La figure 2.4 montre le partage de tâches entre le EPC et l'E-UTRAN.

2.3.1 Le réseau d'accès E-UTRAN

L'architecture du réseau d'accès est formée uniquement par des eNodeBs contrairement au systèmes UTRAN de 3G où on a des Nodes B et des RNCs. Les eNodesBs et les entités MME/SGW



Figure 2.3 – Les éléments du réseau EPS.



Figure 2.4 – Partage de fonctionnalités entre le EPC et l'E-UTRAN.

du réseau coeur se sont partagés les tâches effectuées par le RNC comme le montre la figure 2.5. Une station de base eNodeB est responsable de la réception et la transmission radio avec l'usager. De plus, l'eNodeB est chargée des mesures radio utiles pour la gestion de la mobilité ainsi que pour l'ordonnancement. Elle gère aussi la sélection du MME pour chaque usager lors de l'attachement au cas où la configuration fournie ne spécifie pas le MME[9]. L'eNodeB dispose d'une interface S1 avec le réseau coeur qui consiste en S1-C (S1-Contrôle) entre l'eNodeB et la MME et S1-U (S1-Usager) entre l'eNodeB et la SGW. Une nouvelle interface X2 a été définie entre les eNodeBs adjacentes permettant de réduire la perte de paquets lors de la mobilité quand l'usager est en mode actif on parle de Handover [10].



Figure 2.5 – Architecture du réseau d'accès E-UTRAN.

2.3.2 Le réseau cœur EPC

Le réseau cœur appelé EPC est responsable du contrôle global de l'usager et de l'établissement des bearers. Il permet d'assurer une architecture tout-IP pour simplifier l'accès à divers services fournis dans *IP Multimedia Subsystem* (IMS). Il est composé des éléments suivants:

- une passerelle PDN ou PDN *Gateway* (P-GW): cette entité est chargée de l'allocation des adresses IP aux usagers, elle permet entre autre de filtrer les paquets issus des usagers et les associer aux bearers de la QoS désirée [11].
- une passerelle de service ou Serving Gateway (S-GW): tous les paquets IP de l'usager sont acheminés à travers cette passerelle, elle assure aussi l'ancrage de la mobilité lorsque l'usager change d'eNodeB ou même lorsqu'il change de réseau 3GPP à un autre. Quand l'utilisateur est inactif et que le flux de données en lien descendant est prêt pour le téléchargement, le S-GW assure la pagination [10].
- une entité de gestion de la mobilité ou *Mobility Management Entity* (MME): il s'agit de contrôler le processus de signalisation entre l'usager et le réseau cœur [9]. Cette liaison est assurée par le protocole *Non Access Stratum* (NAS). Les fonctions du MME se répartissent en [16]:
 - des fonctions liées à la gestion des bearers: établissement, maintenance et libération des bearers,
 - des fonctions liées à la gestion des connexions incluant l'établissement de la connexion et la sécurité entre l'usager et le réseau cœur.
- un serveur de l'abonné résidentiel ou encore *Home Server Subscriber* (HSS): cette entité rappelle le HLR (*Home Local Register*) pour les générations précédentes Il contient les informations d'enregistrement de l'usager telles que le profil de la QoS, les restrictions d'accès et les PDN auxquels l'usager pourrait se connecter.
- la fonction de politique de contrôle et de chargement des règles ou *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF): elle est responsable des décisions relatives à la tarification. Elle contrôle aussi l'autorisation des QoSs requises pour un flux donné.

2.3.3 Les interfaces du réseau E-UTRAN

L'un des objectifs principaux de la technologie LTE est de mettre en œuvre des techniques d'autooptimisation pour s'assurer d'obtenir la meilleure performance d'une façon rentable et peu coûteuse; ce-ci est connu comme le *Self-Optimizing Networks* (SONs). Le concept SONs a été considéré avec une importance majeure dans le développement de toutes les procédures liées aux interfaces X2 et S1.

Le réseau de transport des interfaces S1 et X2 utilise la couche IP pour le plan usager et le plan

de contrôle. En plus des services de base garantis par ce protocole, IP dans E-UTRAN doit assurer un certain niveau de sécurité défini dans l'échange de données entre les éléments du réseau 3GPP connu sous *Network Domain Security for IP* (NDS/IP). De plus, il doit assurer le classement du trafic selon la QoS grâce au Diffserv.

2.3.3.1 L'interface S1

L'interface S1 connecte l'eNodeB au réseau cœur selon deux niveaux: un pour le plan de contrôle, S1-C (S1 *Control plane interface*), et l'autre pour le plan usager, S1-U (S1 *User plane interface*). S1-U transporte les paquets des usagers entre l'eNodeB et le S-GW. Cette interface utilise une simple pile de protocole de transport GTP (*GPRS Tunneling Protocol*) sur UDP/IP qui encapsule les données de l'usager. Il n'y a ni contrôle de flux ni contrôle d'erreur, ni aucun mécanisme de garantie de livraison des données sur l'interface S1-U.

L'interface S1-C est utilisée pour la signalisation en assurant un certain nombre de fonctions entre l'eNodeB et le MME.

2.3.3.2 L'interface X2

L'interface X2 permet la connexion entre les eNodeBs. Pour s'échanger des données entre elles, les eNodeBs initient l'établissement de l'interface X2. Par ailleurs, cette interface permet le transfert des paquets mis dans les mémoires tampons entre les eNodeBs. X2-U utilise le même protocole de tunneling GTP utilisé dans l'interface S1-U.

l'interface X2 du plan de contrôle (X2 *Control plane interface*) est une interface de signalisation. Elle supporte un groupe de fonctions et de procédures entre eNodeBs. Ces procédures sont très limitées en nombre et dépendent de la mobilité des usagers entre les eNodeBs, dans le but d'échanger des informations sur la situation de l'usager. Ainsi, l'interface X2-C effectue la procédure du *Load Indicator* pour permettre à un eNodeB de signaler sa condition de charge aux eNodeBs voisines. Cette procédure permet de supporter la gestion du balancement de la charge ou d'optimiser les seuils du handover et par la suite les décisions du handover. Le transport de signalisation fiable entre les nœuds est identique à celui dans l'interface S1-C.

2.4 Les technologies clés de LTE

Pour atteindre les objectifs prédéfinis et répondre aux exigences de l'UIT, 3GPP a proposé de nouvelles techniques clés. Les aspects techniques considérés par les technologies LTE et LTE-Advanced sont principalement les techniques d'accès multiple, les antennes multiples MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) et les techniques de contrôle de puissance et de gestion de l'interférence. Dans ce qui suit, on va présenter les techniques les plus marquantes dans l'évolution vers le LTE.

2.4.1 Les techniques d'accès multiple

3GPP a sélectionné différentes techniques d'accès pour les liens descendant, *downlink*, et montant, *uplink*, pour diverses caractéristiques. L'OFDMA a été retenue pour le downlink c'est-à-dire le lien de l'eNodeB vers l'usager, et le SC-FDMA a été considérée dans le uplink c'est-à-dire pour la transmission de l'usager vers l'eNodeB.

2.4.1.1 OFDMA sur la liaison descendante

L'OFDM pour Orthogonal Frequency Division Multiplexing est déjà utilisée dans les systèmes cellulaires et non cellulaires comme le WiMAX et les WLAN.

Dans la modulation conventionnelle à une seule porteuse, les données sont envoyés en série sur le canal en modulant une seule sous-porteuse à un taux de R symboles par seconde avec une période $T_s = \frac{1}{R}$. L'inconvénient de cette modulation est perçue quand le canal est multi-trajets où la dispersion dans le temps est significative par rapport à la période symbole et ainsi peut causer de l'interférence inter-symboles. Des traitements d'égalisation complexes sont alors indispensables. Le principe de la modulation multi-porteuses a été introduit pour résoudre ce problème. La bande passante disponible est alors divisée en N_c sous-porteuses (voir la figure 2.6). Le principe de la modulation multi-porteuses permet de convertir un flux de données en série à haut-débit en plusieurs sous-flux de données en parallèle à de plus faibles débits [19]. Chaque flux de données est modulé sur une porteuse à part. La dispersion en temps diminue vue les faibles débits par sous-porteuse d'où une réduction de la complexité de l'égalisation. Pour augmenter le débit d'informations à transmettre, il faut plus de flux à envoyer en parallèle et des sous-porteuses plus proches [20] qui doivent être orthogonales. L'orthogonalité des sous-porteuses leur permet de se chevaucher sans interférer. Ce principe assure une grande efficacité spectrale vue que la bande passante est entièrement exploitée. Pour ces vertus, OFDM était un candidat vedette dans le LTE.

Dans le LTE, les sous-porteuses sont espacées de 15 KHz et leur nombre est déterminé selon la



Figure 2.6 – Modulation multi-porteuses.

taille de la bande passante. Pour réaliser une transmission sans ISI (*Inter-Symbol Interference*), il a été convenu d'ajouter un temps de garde entre les sous-porteuses. Ce temps de garde est choisi supérieur à l'étalement du délai, mais aussi pas trop grand pour éviter le gaspillage de la bande de fréquences. Ce temps de garde est le préfixe cyclique qui est une copie de la fin du symbole qu'on insère au début. Le CP, *Cyclic Prefix*, doit être plus grand que le plus grand étalement de délai que pourrait subir le canal radio [22].

L'OFDM fait face aux deux inconvénients suivants: un taux de débit crête élevé, PAPR, *Peak-to Average power Ratio*, et une synchronisation robuste indispensable pour compenser le déplacement de fréquences, *frequecy offset*. Le PAPR est défini comme la puissance maximal durant un symbole OFDM normalisé par la puissance moyenne du signal [21]. Quand des sous-porteuses sont en phase, le PAPR est très grand et c'est le cas de l'OFDM classique. Ce problème disparait avec un précodage linéaire pour déplacer le PAPR au domaine fréquentiel.

Quant au *frequecy offset*, il est dû à la différence de fréquences entre les oscillateurs locaux au niveau de l'émetteur et du récepteur ce qui provoque un décalage de fréquences.

2.4.1.2 SC-FDMA sur la liaison montante

SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*) a été choisi comme la technique de transmission en lien montant, de l'usager vers l'eNodeB. Il diffère de OFDM par la forme de génération des flux de données mais il assure la même performance et présente le même degré de complexité que OFDMA. Le SC-FDMA est semblable à OFDMA où des symboles de données du

domaine temporel sont transformés au domaine fréquentiel par DFT (*Discret Fourier Transform*) avant de passer par une modulation OFDMA. Les figure 2.7 et 2.8 montrent les différences entre



Figure 2.7 – Modulation multi-porteuses OFDMA et SC-FDMA.

l'OFDMA et SC-FDMA en termes d'implémentation. Dans la figure 2.8, extraite de [22], on visualise une série de symboles QPSK avec quatre sous-porteuses et deux périodes. Pour l'OFDMA, quatre symboles QPSK sont transmis en parallèle sur les quatre sous-porteuses modulées en fréquence. Pour le SC-FDMA, les quatre symboles sont transmis en série dans le temps avec un taux quatre fois celui de l'OFDMA puisque chaque symbole occupe les N_c sous-porteuses. Le SC-FDMA permet ainsi de transmettre avec le même PAPR que les symboles initiaux à l'encontre de l'OFDMA qui amplifie le PAPR.

2.4.1.3 MIMO

La technique de transmission multiple MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) est utilisée dans le LTE pour permettre de transmettre des flux en parallèle sur le même canal. Le MIMO ajoute ainsi une dimension en plus du multiplexage en temps et en fréquence; on parle de la diversité spatiale. Cette diversité spatiale permet d'exploiter plus de ressources et augmente la capacité, donc plus d'usagers par cellule.

Dans le LTE, trois schémas de techniques MIMO sont supportées: la diversité en transmission (TxDiversity) ou MISO pour Multiple Input Single Output, la diversité en réception (Rx Diversity)



Figure 2.8 – La visualisation des modulation multi-porteuses OFDMA et SC-FDMA.

ou SIMO pour *Single Input Multiple Output* et le multiplexage spatial dans le cas du MIMO. La transmission sur chaque antenne doit être identifiable d'une façon unique pour que chaque récepteur parvienne à déterminer la combinaison qu'il est sensé recevoir. Cette tâche est assuré par l'insertion de signaux pilotes qui utilisent un modèle orthogonal et une disposition particulière dépendamment de l'antenne en questions [12]. Une forme conventionnelle de MIMO envoie un flux de données sur chaque antenne et puis le canal multiplexe les différents flux. Une forme avancée de MIMO suggère que chaque flux est envoyé sur plus qu'une antenne en utilisant une technique de précodage. Pour que cette méthode fonctionne, l'émetteur doit connaitre l'état du canal. Les gains des techniques MIMO est fonction alors du nombre d'antennes, des conditions radio du canal, de la capacité à s'adapter aux changements de l'environnement et au SNR (*Signal-to-Noise ratio*).

On parle de SU-MIMO (*Single User MIMO*) et MU-MIMO (*Multi User MIMO*). Le SU-MIMO permet d'augmenter de débit pour un usager. Les flux de l'usager sont précodés et transmis puis multiplexés par le canal. Dans le cas de MU-MIMO, le débit individuel ne change pas mais on augmente la capacité de la cellule. Les flux de données envoyés par les différents usagers sont multiplexés par le canal après précodage. On trouve aussi le MIMO coopératif Co-MIMO (*Cooperative MIMO*) où les eNodeBs coopèrent en s'échangeant les flux de données pour précoder les flux de données dans le domaine spatial.
2.4.2 Le réseau d'accès radio

Le réseau d'accès radio RAN (*Radio Access Network*) est la partie de l'architecture de LTE qui relie l'eNodeB à l'usager. Au sein du RAN s'effectue les allocations de ressources aux usagers assurées par l'eNodeB ce qui procure une certaine QoS au système d'où l'importance de cette interface radio. Dans la suite, on va présenter les différentes couches dans la pile de l'interface radio LTE [13, 14] illustrées par la figure 2.9.



Figure 2.9 – Architecture des protocoles de l'interface radio de LTE.

2.4.2.1 La couche physique

La couche physique dans le LTE joue un rôle très important dans le transfert des données et des informations de contrôle entre l'eNodeB et l'usager par l'intermédiaire de canaux de transport via la couche MAC (définie plus bas). La couche physique dans le LTE est dotée de techniques clés prometteuses à savoir l'OFDMA dans le downlink et le SC-FDMA dans le uplink en plus de supporter les structures de trames TDD (*Time Division Duplexing*) et FDD (*Frequency Division Duplexing*). Les principales fonctions de la couche physique dans le LTE sont [15, 17]:

- détection des erreurs de la couche transport et livraison du rapport aux couches supérieures,
- codage et décodage des données,
- adaptation du débit de transmission sur la couche transport au canal physique,

- translation du canal de transport en canaux physique,
- modulation et démodulation du canal physique,
- synchronisation temporelle et fréquentielle,
- traitement des signaux pour la transmission MIMO.

Dans le LTE, la sub-canalisation est assurée par l'OFDMA où les données sont envoyées vers et à partir de plusieurs usagers sur une période de symboles donnée. Bien que le LTE supporte dans ses spécifications les modes du duplexage TDD et FDD, le marché a opté pour le FDD vue que le TD-LTE, pour TDD LTE, utilise une trame spéciale pour le temps de garde nécessaire pour passer du *downlink* au *uplink* [23].

La couche physique assure le transport de données aux couches supérieures via les canaux de transport. Un autre concept dans la couche physique de LTE est la modulation et le codage adaptatif, *Adaptive Modulation and Coding* (AMC). Les techniques AMC sont très robustes dans l'adaptation de liens utilisée dans la 4G. Il s'agit d'adapter le schéma de modulation et de codage, MCS pour *Modulation and Coding Scheme*, à la variation du canal, en d'autres termes transmettre avec de faible taux quand le canal est mauvais et transmettre avec des taux élevés en utilisant le MCS le plus approprié quand la qualité du canal s'améliore.

Dans le LTE, les ressources sont allouées aux usagers par l'eNodeB en nombres de sous-porteuses en temps et en fréquence sous forme de ressources blocs physiques, PRBs pour *Physical Resource* blocks. Le nombre total de PRBs dépend de la bande passante utilisée allant de 1.25 MHz jusqu'à 20 MHz et a été défini dans les spécifications du LTE. Une PRB est formée de 12 sous-porteuses chacune de taille 15 KHz et s'étend sur un intervalle de temps, *Time slot* T_s , de 0.5 ms. Chaque slot de temps consiste en six ou sept symboles OFDM selon que le préfixe cyclique est normal ou étendu.

Dans le LTE, on présente deux formats de sous-trames selon le mode de duplexage FDD ou TDD. Dans le format 1 pour le FDD, les slots de temps sont regroupés par deux pour former les soustrames. Un ensemble de 10 sous-trames, de taille 10 ms, forment une trame radio. Les transmissions en uplink et downlink sont séparées dans le domaine fréquentiel. Pour TDD, la structure de trames est différente. Une trame radio est formée de deux semi-trames de taille 5 ms chacune consistant en 5 sous-trames. Ce partage en deux semi-trames traduit la périodicité entre le uplink et le downlink en TDD. Les sous-trames peuvent ainsi être des sous-trames de transmission de données soit des sous-trames spéciales contenant des signaux pilotes, les DwPTS (*Downlink Pilot Time Slot*) et les UpPTS (*Uplink Pilot Time Slot*) séparés par un gap, Gp. Pour plus de détails sur la structure de trames dans LTE, on peut se référer à [12].

2.4.2.2 La couche 2: MAC, RLC et PDCP

La couche MAC (*Medium Access Control*) est la couche responsable du multiplexage et démultiplexage des données entre les couches physique et RLC (Radio Link Control). La communication avec la couche physique est assurée par des liens entre ses canaux logiques et les canaux physiques (Fig. 2.9). Les principales fonctions au sein de la couche MAC sont le partitionnement des ressources radio entre les usagers, la procédure d'accès aléatoire, l'alignement du passage pour le Uplink, la réception discontinue et le transfert des données liées au partitionnement de ressources [13].

Dans le LTE, la couche MAC possède une interface indépendante pour se connecter à la couche physique pour supporter les traitements liés à la gestion des ressources physiques. Les canaux logiques sont définis selon le type des services offerts par la couche MAC.

Au niveau du RLC (*Radio Link Control*), les paquets, PDUs (*Packet Data Units*) reçus au niveau de l'eNodeB ne sont capables d'être transmis que s'ils sont segmentés en des paquets de plus petite taille avant de les transmettre à l'usager. Dans le sens inverse, de l'usager vers l'eNodeB, les paquets sont réassemblés avant de passer au réseau cœur.

Pour s'assurer de la délivrance des paquets, LTE utilise des techniques de retransmission. L'ARQ (Automatic Repeat Request), qui assure la retransmission entre les couches MAC et PDCP (Packet Data Convergence Protocol). Cependant le HARQ, (Hybrid ARQ), s'assure de la délivrance des paquets entre les couches MAC des différentes entités du réseau. Le HARQ envoie un nombre donné de paquets et attend pour un acquittement, ACK (ACKnowledgement), avant d'entamer la transmission d'autres paquets. Si un NACK est reçu acquittant qu'un paquet a été perdu, seul ce paquet serait retransmis.

2.4.3 Les technologies d'évolution vers LTE-Advanced

Certes, le LTE a répondu aux exigences de l'IMT mais ce-ci a motivé l'IMT à présenter de nouvelles exigences dites *IMT-Advanced*. Les *Releases* 10 et plus de LTE/3GPP ont satisfait les nouvelles exigences. À partir des *releases* 10, on parle de LTE-Advaned. Les mêmes architectures de réseaux ont été considérées ainsi que les technologies clées du LTE. Cependant, pour effectuer

le passage en LTE-Advanced certaines techniques ont été considérées pour contribuer à l'évolution et assurer l'amélioration des performances et des capacités. Les nouvelles techniques dans le LTE-Advanced sont principalement: l'agrégation de ressources, les techniques MIMO améliorées, les techniques d'auto-optimisation, l'introduction des nœuds relais et le déploiement des réseaux hétérogènes.

Pour augmenter la largeur de la bande de transmission, le LTE-Advanced suggère l'agrégation de sous-porteuses. Ces sous-porteuses peuvent être contigües ou non, et appartenir à la même bande ou à des bandes différentes [18] comme l'illustre la figure 2.10.

En plus des techniques SU-MIMO, le LTE-Advanced parvient à spécifier les techniques pour le MU-



Figure 2.10 – Agrégation de sous-porteuses dans le LTE-Advanced.

MIMO. Pour transmettre à plusieurs usagers simultanément, on utilise la technique d'accès multiple dans l'espace, SDMA (*Spatial Division Multiple Access*). Des schémas de diversité en boucle ouverte et en boucle fermée sont aussi considérés avec collecte de feedback et de procédures de précodage. On trouve aussi les relais qui sont des nœuds contribuant à améliorer la couverture ainsi que la capacité du réseau, augmenter la couverture ou l'étendre dans les zones rurales. Le nœud de relai, dans son rôle de base, reçoit, amplifie et ensuite retransmet les signaux. Le noeud de relai est connecté au réseau d'accès E-UTRAN à travers une connexion sans fil à une station de base eNodeB, appelée nœud donneur [18].

Conclusion

Dans ce chapitre, on a survolé les principales technologies de l'IMT-Advanced: LTE. On a présenté le LTE étant un candidat pour les technologies IMT-Advanced pour proposer une interface radio capable de satisfaire et même de dépasser les attentes de l'UIT. Pour ce faire, 3GPP a défini certaines techniques clés pour arriver à ces objectifs.

Pour valider ces technologies, des groupes d'évaluation ont été formés dans tout le globe, le CEG était un des groupes dont on faisait partie. On a évalué l'interface radio proposée par 3GPP au sein d'un groupe formé de plusieurs entités indépendantes. À la fin, on a réuni tous les résultats pour les présenter à l'UIT. Dans le chapitre suivant, on va présenter notre travail dans ce cadre en décrivant le simulateur qui nous a servi de plateforme tout au long de notre travail.

Chapitre 3

Évaluation des technologies LTE à l'aide du simulateur LTE

Afin d'évaluer les systèmes LTE, chaque membre évaluateur devait posséder sa porpore plateforme de test. Pour ce faire, on a utilisé notre propre simulateur LTE qu'on a adapté selon notre démarche de travail et nos objectifs.

3.1 Le simulateur LTE

Pour étudier le comportement des systèmes radio mobiles dans un scénario se rapprochant le plus de la réalité, on a toujours considéré une approche d'abstraction. Cette méthode permet de reproduire les éléments du réseau mobile avec une grande précision (les usagers mobiles, les stations de base, le canal, l'évanouissement de canal, l'ombrage, les bruits, etc). De plus, le coût élevé de se procurer le matériel nécessaire pour l'évaluation des réseaux mobiles rend cette méthode indispensable dans l'étude de nouveaux standards et techniques.

Dans notre situation, on a opté pour cette stratégie pour évaluer la technologie radio 3GPP/LTE-Advanced en premier lieu, et étudier l'impact des réseaux hétérogènes (décris plus tard dans la thèse) sur la performance du réseau en second lieu avec le moindre coût et un temps de simulation inférieur à la réalité. Notre étude est basée sur le partage des simulations en deux niveaux: le niveau lien (*link level*) et le niveau système (*system level*). Dans le cadre de l'évaluation des technologies *LTE-Advanced*, [41] a présenté un document pour appuyer l'évaluation des nouvelles technologies. En plus de notre aptitude à utiliser cette approche, on a eu recours à ce document pour être le plus conforme au déroulement de l'évaluation au sein du groupe.

Pour expliquer cette approche, on présente les deux volets qui constituent nos simulations:

- les simulations au niveau lien (*Link Level Simulations*): il s'agit d'étudier le comportement du lien radio entre un seul émetteur et un seul récepteur, dans notre cas on considère une station de base qui émet à un seul usager mobile,
- les simulations au niveau système (System Level Simulations): ces simulations étudient le comportement global du réseau en tant qu'un ensemble de stations de base, d'équipements usagers et d'autres entités assurant le fonctionnement du réseau. À ce niveau, on s'intéresse aux problèmes de plus haut niveau liés à la couche liaison de données (Media Access Control MAC) tels que la mobilité, l'ordonnancement, la gestion des ressources radio, etc Les simulations au niveau système permettent l'étude de la performance du système dans un environnement spécifié sur une durée de temps. Leur utilité est d'évaluer la performance du réseau en récupérant certains paramètres indicateurs tels que le débit de transmission par utilisateur ou par cellule, le nombre d'appels bloqués, les SINRs, etc.

À ce stade de notre étude, on s'intéresse au développement du simulateur au niveau système qui exploite des résultats déjà obtenus au niveau lien.

3.1.1 Tâches effectuées et méthodologie

Les travaux ont compris l'évaluation par des simulations au niveau de la liaison radio en utilisant des outils de simulation développés ou acquis indépendamment par chaque membre évaluateur. Dans notre cas, on a utilisé notre propre simulateur. Les tâches ont été réalisées suivant les lignes directrices proposées par l'UIT et les rapports de propositions formulées par les candidats. Le travail est divisé en deux parties principales; des simulations au niveau lien, un lien unique mettant en scène une station de base et un usager, et des simulations au niveau système, environnement multi-usager multi-cellulaire. Un outil de cartographie sera utilisé pour traduire les résultats du niveau lien pour s'en servir au niveau système [41].

L'analyse du niveau lien donne des informations sur la performance des indicateurs fondamentaux. La performance globale du système dans un environnement réel avec plusieurs stations de base et un grand nombre d'utilisateurs mobiles actifs ne peut être évaluée que par l'analyse au niveau système. Cette méthode est basée sur l'abstraction de la couche physique au niveau lien qui a pour but de prédire le comportement instantané pour une liaison simple et la détermination du taux d'erreurs de bloc (BLER *Block Error Rate*) pour différentes valeurs du SNR. Les simulations au niveau lien sont effectuées pour un canal à bruit blanc additif gaussien et une configuration d'antenne SISO (Single Input Single Output) tandis que les simulations au niveau système sont exécutées pour un environnement multi-usager multi-cellulaire réaliste. Une translation des résultats du niveau lien est effectuée pour les incorporer au niveau système. La figure 3.1 illustre la correspondance entre le niveau lien et le niveau système.

Afin d'évaluer le débit de la liaison descendante, seuls les paquets en liaison descendante sont pris



Figure 3.1 – Correspondance entre les niveaux lien et système.

en compte dans les calculs. Le débit de données d'un utilisateur est défini comme le rapport du nombre des bits d'information reçus avec succès par l'utilisateur divisés par la durée de simulation totale.

3.1.2 Modélisation du simulateur

Notre simulateur LTE est un outil robuste permettant d'étudier les technologies LTE selon les spécifications du standard LTE tout en permettant sa promotion pour accueillir d'autres composants ainsi que d'autres techniques. Le simulateur nous permet de rassembler plusieurs indicateurs de performance. Pour commencer, nous devons préciser les composantes de la plateforme réseau et leurs paramètres pour former le scénario désiré. Ces composantes sont:

- les stations de base: constituent les émetteurs dans notre approche d'étude dans la liaison descendante,
- les usagers: se sont les mobiles utilisant plusieurs types de services,
- La carte de trafic: offre des informations sur le nombre d'usagers et les services disponibles dans une zone spécifique du réseau,
- les ressources: regroupent les ressources fréquentielles sous forme de blocs de ressources et les ressources temporelles sous forme de permission de transmission durant un intervalle TTI,
- le lien radio: caractérise la propagation des signaux entre l'émetteur et le récepteur. Il doit tenir compte de l'atténuation de perte de chemin (*pathloss*), l'évanouissement lié à l'ombrage (*shadow fading*) et l'atténuation multi-trajets (*multipath fading*),
- les antennes: les stations de base et les usagers sont équipés d'une ou plusieurs antennes, différenciées par le gain, la polarisation, etc...
- l'ordonnanceur: permet d'allouer les ressources entre les différents usagers selon une politique bien définie.



Figure 3.2 – Modélisation du simulateur au niveau système.

Pour effectuer nos simulations, on définit une région d'intérêt (*Region of Interest*, ROI) où les stations de bases (eNBs) et les usagers mobiles sont positionnés. Les eNBs sont situées aux centres des cellules macros hexagonales formant une grille couvrant la ROI. Ces cellules se composent de trois secteurs chacune. Les usagers sont uniformément répartis au sein des cellules eNBs.

Notre simulateur LTE comprend une partie centrale composée de deux modèles: un modèle de mesure du lien [42] et un modèle de performance du lien [43] comme l'illustre le schéma de la figure 3.2. Le modèle de mesure du lien fait abstraction de la qualité du lien mesurée utilisé pour l'adaptation du lien et l'allocation des ressources. Le modèle de performance du lien détermine le taux d'erreur par bloc (BLER) au niveau du récepteur en se basant sur les informations fournies sur l'allocation des ressources et les schémas de codage et de modulation (MCS).

3.1.3 Correspondance entre les niveaux lien et système

Afin d'évaluer le BLER des blocs de transport reçus, le simulateur exploite les courbes de performance d'un canal avec un bruit blanc gaussien additif (AWGN) au niveau lien. Ensuite, il effectue un mappage SINR-BLER en utilisant une valeur effective du SINR, notée γ_{eff} . Cette valeur est obtenue en faisant la correspondance entre l'ensemble des SINRs des sous-porteuses allouées aux usagers et l'ensemble des SINRs équivalents pour un AWGN.

Le mappage effectif exponentiel du SINR (*Effective Exponential SINR Mapping*, EESM) [44, 45, 46] est la méthode utilisée par le simulateur pour obtenir le SINR effectif pour un bloc de transport donné. Ce γ_{eff} est utilisé pour assurer le mappage avec le BLER obtenu à partir des simulations au niveau lien du AWGN. La valeur de γ_{eff} est la moyenne non linéaire suivante pour les SINRs des différents blocs de ressources (RBs):

$$\gamma_{eff} = EESM(\gamma_i, \beta) = -\beta . ln(\frac{1}{N} . \sum_{i=1}^{N} e^{-\frac{SINR_i}{\beta}}),$$

N est le nombre total des RBs à moyenner et le paramètre β est calibré à travers les simulations du niveau lien pour adapter la fonction de compression aux BLERs résultant du AWGN [47]. Il est possible de ne pas considérer dans le calcul tous les RBs des sous-porteuses, et plutôt ne considérer qu'un sous-ensemble tant que l'espacement fréquentiel entre deux valeurs du SINRs n'excède pas la moitié de la cohérence de la bande passante [47]. En utilisant les courbes de BLER du AWGN, la valeur de γ_{eff} est alors mappée en BLER. Ainsi, le rapport de feedback des CQIs envoyé par l'usager permet au eNB d'avoir l'état du canal vu par l'usager correspondant. La figure 3.3 illustre la fonction de mappage SINR-CQI.



Figure 3.3 – Correspondance SINR-CQI.

3.2 Évaluation des technologies LTE-Advanced

Comme on l'a déjà évoqué, ITU-R a déclenché l'évaluation des interfaces radio des technologies IMT-Advanced proposées. Plusieurs groupes d'évaluation ont entamé le processus d'évaluation. Au Canada, le CEG, *Canadian Evaluation Group*, était chargé de cette tâche qu'il assurait sous les auspices de l'organisation national canadienne pour l'ITU. Notre travail a débuté dans ce cadre d'évaluation avec le CEG et IC (*Industrie Canada*) afin d'évaluer les deux candidates aux technologies IMT-Advanced: 3GPP-LTE et IEEE WiMAX [30]. Parmi les autres membres, notre objectif était de valider les deux propositions et vérifier si elles sont conformes aux exigences de l'ITU. Pour faire ce travail, il fallait étudier le comportement des systèmes LTE et WiMAX pour le mode de duplexage FDD et la liaison descendante. La performance des deux systèmes se traduit en termes de l'efficacité spectrale de la cellule, l'efficacité spectrale au bord de la cellule, la mobilité et la capacité VoIP selon la méthodologie présentée dans le rapport ITU-R M.2135.

Paramètre	Description
Modulation	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Mode de duplexage	FDD
Estimateur	MMSE
Codage Canal des données	Convolutional Turbo Coding
	(CTC)
HARQ	Chase Combining
Bande passante	10 MHz
Fréquence porteuse	$2.5~\mathrm{GHz}$
Préfixe cyclique	Normal
Taille de la DFT	1024

Tableau 3.1 – Paramètres des simulation au niveau lien.

3.2.1 Les simulations au niveau lien

Pour effectuer des simulations au niveau lien, nous avons utilisé un simulateur basé sur Matlab conforme aux exigences de l'UIT. Pour ce faire, nous avons suivi ces étapes:

- ajuster le simulateur de niveau lien aux directives dans [25],
- exécuter des simulations au niveau lien et obtenir les résultats en termes de FER (*Frame Error Rate*) ou BLER en fonction de SNR,
- Traduire le FER/BLER en débit au niveau lien par utilisateur.

En fait, les courbes de FER/BLER au niveau lien sont obtenues pour différentes combinaisons de modulation et de codage MCSs, puis elles sont introduites dans le simulateur au niveau système pour exploiter la performance du niveau lien entre les différentes stations de base et les usagers d'une manière simple sans avoir à simuler les liaisons entre ces deux entités dans un environnement dense en usagers et en cellules.

3.2.1.1 Paramètres des simulations au niveau lien

Les simulations au niveau lien pour la technologie 3GPP/LTE ont été exécutées pour différents MCSs. Les hypothèses sont présentées dans le tableau 3.1 [2]. Les hypothèses sont alignées avec les lignes directrices fournies dans le rapport UIT-R M.2135. Nous nous sommes aussi référés à un ensemble de documents 3GPP [26, 27, 28, 29]. Les résultats sont obtenus pour une bande passante de 10 MHz.

3.2.1.2 Résultats des simulations

Pour les simulations, on a considéré un canal AWGN avec une configuration SISO. Il s'agit d'une recommandation dans le document EMD [7] qui permet pour le mappage des résultats du niveau lien au niveau système et ce, indépendamment de l'environnement à simuler au niveau système. Dans ce qui suit, nous présentons des résultats pour l'évaluation de la proposition 3GPP/LTE. La figure 4.3 présente le BLER en fonction du SNR pour différents MCSs. Cette courbe sera injectée dans les simulations système qui servent comme données faisant abstraction au comportement instantané sur le lien entre l'eNB et l'usager. Ces valeurs de BLERs sont aussi exprimées en débit usager illustré dans la figure 3.5.



Figure 3.4 – BLER en fonction du SNR pour un canal AWGN SISO.

3.2.2 Les simulations au niveau système

Les simulations au niveau système sont exécutées pour un scénario réaliste qui mappe la distribution des utilisateurs, la configuration des cellule, les variations de l'environnement et l'ordonnancement des usagers. Les simulations au niveau système visent à évaluer la performance du système en étudiant différents paramètres. Dans notre travail, nous avons considéré l'efficacité spectrale de la cellule, l'efficacité au bord de la cellule et la mobilité spectrale.

Le tableau 3.2 récapitule les paramètres des simulations.



Figure 3.5 – Débit par usager en fonction du SNR pour un canal AWGN SISO.

Paramètre	Description
Mode de duplexage	FDD
Bande passante	10 MHz DL pour FDD, pour UMi et UMa
	20 MHz pour InH
Ordonnanceur/Scheduler	DL: Proportional Fair en temps et en fréquences
Schéma de transmission	2x2 OLSM SU-MIMO
Récepteur	MMSE
Schéma de HARQ	Chase Combining
Configuration d'antennes au eNodeB	Antennes co-polarisées non corrélées
Configuration d'antennes au UE	Antennes polarisées verticalement

Tableau 3.2 – Paramètres des simulations au niveau système.

3.2.2.1 Résultats des simulations

Nous avons effectué des simulations au niveau système afin d'évaluer l'efficacité spectrale de la cellule, l'efficacité spectrale au bord de la cellule et la mobilité et les comparer aux exigences proposées par l'UIT. Ces indicateurs de performance sont définis comme suit.

Environnement	Valeurs exigées par l'UIT	Résultats des simulations
Indoor	3	7.56
Micro-cellulaire Urbain	2.6	3.75
Macro-cellulaire Urbain	2.2	2.4

Tableau 3.3 – Efficacité spectrale de la cellule en bps/Hz/cellule.

Tableau 3.4 – Efficacité spectrale au bord de la cellule en bps/Hz/cellule.

Environnement	Valeurs exigées par l'UIT	Résultats des simulations
Indoor	0.1	0.223
Micro-cellulaire Urbain	0.075	0.1
Macro-cellulaire Urbain	0.06	0.058

Tableau 3.5 – Efficacité spectrale pour évaluer la mobilité.

Scénario	Exigence	Vitesse	Fréquence	Doppler	SNR	Résultat
	$\mathrm{bps/Hz}$	$\rm km/h$	GHz	Hz	Médiane	$\mathrm{bps/Hz}$
Microcellulaire	0.75	30	2.5	69.4	6.2 dB	1.44
urbain						

- L'efficacité spectrale de la cellule est définie, dans M.2134, comme le rapport du débit total de tous les usagers par la largeur de bande de canal, divisé par le nombre de cellules. L'efficacité spectrale de la cellule est mesurée alors en bps/Hz/cellule. Le tableau 3.4 illustre les valeurs des efficacités spectrale par cellule pour les différents environnements de test exigés par l'UIT.
- 2. L'efficacité spectrale de l'utilisateur du bord de la cellule est donnée par 5% de la fonction de distribution cumulative (CDF) du débit normalisé de l'usager. Le tableau 3.3 donne l'efficacité spectrale au bord de la cellule pour les différents environnements tel que requis par l'UIT. Nous remarquons que 3GPP/LTE répond aux exigences de l'UIT.
- 3. La mobilité: L'évaluation de la mobilité suit les lignes directives de l'UIT dans le rapport UIT-R M.2135. Il s'agit de considérer des simulations système comme celles effectuées dans le but d'évaluer l'efficacité spectrale. Ensuite, présenter les CDFs des SINRs obtenus pour l'environnement et la vitesse en question puis prendre la valeur au 50% de la courbe de CDF. Cette valeur est entrée dans les simulations au niveau lien pour l'environnement et la vitesse correspondant. Enfin, on calcule l'efficacité spectrale au niveau lien et on la compare avec la valeur exigée par l'UIT. Dans notre cas, on a étudié la performance en mobilité en simulant uniquement un environnement micro-cellulaire comme présentée dans le tableau 3.5.

Compte tenu des résultats obtenus, nous concluons que la technologie 3GPP/LTE satisfait aux exigences de l'UIT.

Conclusion

Pour valider cette technologie, des groupes d'évaluation ont été formés dans tout le globe, le CEG, dont on faisait partie, était un de ces groupes. On a évalué l'interfaces radio proposée, au sein d'un groupe formé de plusieurs entités indépendantes, puis à la fin, on a réuni tous les résultats pour les présenter à l'UIT. On a pu prouver que le LTE satisfaisait bel et bien et même dépassait les exigences avancées par l'UIT en respectant les recommandations dictées et mener une évaluation cohérente et minitueuse.

Chapitre 4

Les réseaux hétérogènes

Introduction

La croissance rapide du marché des nouvelles technologies suit le besoin grandissant des utilisateurs de communiquer et d'échanger constamment des messages, des e-mails, des vidéos, Ainsi, le réseau Internet connait une expansion remarquable de jour en jour. Ce développement est encouragé par l'évolution des technologies au niveau des équipements d'une part, et au niveau des applications et logiciels d'autre part. Cette évolution, aussi avantageuse pour les usagers que pour les fournisseurs, ne demeure pas sans inconvénients liés principalement à la disponibilité du service, sa qualité et son coût. Pour contourner ces problèmes, les technologies *IMT-Advanced* proposait une migration des réseaux homogènes vers une nouvelle structure de réseaux hétérogènes qui seraient capables d'absorber l'expansion rapide des réseaux de communications et d'assurer une meilleure étendue de connectivité.

4.1 Introduction aux réseaux hétérogènes

Les ressources fréquentielles demeurent toujours rares et coûteuses, ce qui constitue un gros problème devant la croissance des besoins en services de communications. L'efficacité spectrale des réseaux sans fil atteint ses limites théoriques ce qui implique la nécessité d'augmenter la densité des nœuds pour améliorer la capacité du réseau. Pour résoudre ce problème, l'idée est d'ajouter des cellules macro aux cellules existantes. Cependant, cette solution semble apporter d'autres problèmes si le déploiement existant des cellules est déjà dense créant ainsi des interférences inter-cellules. Plusieurs alternatives se présentent:

- promouvoir la couche macro en améliorant l'accès radio par l'ajout de spectre de fréquences ou d'autres antennes, l'apport de cette solution est négligeable dans le uplink. Toutefois, cette solution reste limitée en termes de débit,
- augmenter le nombre de nœuds macro pour diminuer la distance entre les usagers et les stations de base les desservant ce qui augmente les débits dans le uplink et le downlink. Cependant, cette solution s'avère très coûteuse pour déployer de nouvelles cellules macro et trouver les positions adéquates.

Étant donné que l'idée de densifier les réseaux avec de nouvelles cellules était retenue, il reste à bien définir la façon de le faire afin de tirer le maximum de gain en efficacité spectrale sans ajouter beaucoup d'interférence et éviter les inconvénients liés aux deux solutions citées ci-haut. Il s'agit alors de déployer de nouvelles cellules à faible puissance d'émission et de plus petites tailles. Ces nouveaux réseaux combinant des cellules macro à des nœuds à faible puissance constituent les réseaux hétérogènes qu'on va appeler dans ce qui suit HetNets pour *Heterogeneous Networks*.

4.1.1 Motivations pour les réseaux hétérogènes

Plusieurs raisons d'ordres technologique et économique ont initié le développement des HetNets. Ce nouveau concept promet d'importantes retombées sur l'avenir des télécommunications.

4.1.1.1 La demande croissante de grande capacité

Dans les dernières années, l'utilisation de l'Internet mobile a connu une grande explosion [31]. Cette croissance résulte du développement des appareils intelligents et de l'attachement des utilisateurs aux applications offertes. Par exemple, un téléphone intelligent de 3G consomme en moyenne trente fois la capacité consommée par un téléphone 2G, une tablette consomme cinq fois la capacité consommée par un téléphone intelligent. De plus, le fait que la taille des écrans, la résolution de l'image et l'autonomie de la batterie des terminaux intelligents continuent d'augmenter, et que les infrastructures de réseau continuent de s'améliorer en termes de débit de données, l'attachement à ces technologies ne cesse alors de suivre la tendance croissante [32].

4.1.1.2 De la capacité spectrale à l'efficacité réseau

Les efforts pour améliorer les interfaces radio se sont succédés ces dernières décennies pour réaliser le maximum de gain en débit jusqu'à arriver à la limite théorique connue par la capacité de Shannon [32]. Ces améliorations ont donné des résultats impressionnant en termes d'efficacité spectrale, une métrique tant utilisée pour évaluer la performance des systèmes de télécommunications. Cependant, vue la demande excessive en ressources et en services, il a fallu considérer un ordre de performance plus important pour satisfaire ces besoins. Ainsi, on parle d'une efficacité de toute une combinaison de technologies ne s'arrêtant pas à l'interface radio mais plutôt parler de l'efficacité du réseau entier. Pour maximiser cette efficacité, la solution est de passer aux réseaux hétérogènes avec plusieurs mini-cellules sur lesquelles les usagers peuvent décharger leur trafic éventuel.

4.1.1.3 Impact sur les revenus des opérateurs et les investisseurs

Au cours des dernières années, le changement des services de voix à commutation de circuits et des SMS vers les services de données a influencé les chiffres d'affaires réalisés par les opérateurs des réseaux de télécommunications. Ce changement est lié au fait que les services de données mobiles consomment plus de bits et sont ainsi plus coûteuses mais peu rentables par rapport aux services traditionnels de voix et de SMS. De plus, le développement explosif des applications mobiles obligent les fournisseurs de service à suivre cette tendance en assurant les ressources utiles aux usagers ce qui implique des dépenses énormes en capital. Étant donné toutes ces contraintes, les opérateurs optent pour la solution qui assure un compromis entre le coût et l'efficacité.

Toutes ces contraintes combinées pointent vers les réseaux hétérogènes comme la solution la plus adéquate vis-à vis de la limite des ressources et du coût et de la simplicité du déploiement de nouvelles infrastructures capable d'absorber l'évolution des terminaux et des demandes en services.

4.1.2 Définition des réseaux hétérogènes

Le concept HetNets est devenu la vedette du marché des télécommunications ces dernières années. En effet, ce terme est utilisé pour décrire plusieurs scénarios de combinaisons de nœuds ou de technologies. Dans certaines situations, il désigne la coexistence des cellules utilisant la même technologie d'interface radio: des cellules macro avec des petites cellules pico ou femto. Dans d'autres situations, il s'agit de la coexistence de nouvelles topologies de réseaux et de connectivité faisant partie des HetsNets comme la présence de hotspot personnel, des relais, du peer-to-peer, De plus, le partage flexible et dynamique du spectre permet de penser à introduire des techniques cognitives comme une partie des HetNets. En pratique, les HetNets sont définis comme étant la combinaison de cellules macro, de cellules pico/femto et de relais. Dans notre étude, un HetNet constitue plusieurs couches de cellules de tailles et d'étendue différentes avec la même technologie d'interface radio.

4.1.3 Architecture et scénarios de déploiement des HetNets

Les réseaux hétérogènes se présentent sous différentes architectures et implémentation selon les contraintes du marché et des coûts. Le déploiement le plus classique demeure celui de la coexistence de cellules femto au sein des cellules macro. Cependant, on trouve plusieurs genres de nœuds à attacher aux cellules macro. La figure 4.2 montre une topologie simplifiée d'un scénario HetNet.



Figure 4.1 – Architecture d'un réseau hétérogène.

Les cellules femto sont de petites tailles et déployées dans un environnement indoor par les usagers afin d'étendre la couverture de réseaux ou dans un environnement rural où les cellules

Nœuds	Raccordement	Accès	Notes
	(Backhaul)		
HeNodeB	DSL	Closed Subscriber Group	Déployé à l'intérieur par
			l'usager
Nœuds Pico	X2	Accès ouvert	Déployé à l'intérieur ou
			à l'extérieur, planifié
Nœud Relai	WiFi	Accès ouvert	Déployé à l'intérieur ou
			à l'extérieur, planifié

Tableau 4.1 – Les différents nœuds des HetNets.

macro présentent des trous de couverture. Les cellules femto sont connectées au réseau coeur via le service de connexion à Internet comme le DSL sans avoir recours à un raccordement à l'opérateur mobile. Le plus souvent, l'accès aux cellules femto est réservé à un groupe particulier d'usagers ce qu'on appelle *Closed Subscriber Group*. Les cellules femto sont installées par l'usager lui-même dans des positions non planifiées ce qui contraint à la gestion de ressources et à l'interférence radio. Une cellule femto est notée par la suite HeNodeB.

Les cellules pico constituent aussi une classe de petites cellules des HetNets. Ces nœuds utilisent la même technologie d'interface radio et partagent le même spectre que les cellules macro. Cette classe de petites cellules possède une capacité en nombre d'usagers supérieure à celle des cellules femto et fournit des services de voix et de données dans un environnement indoor comme dans des centres commerciaux ou outdoor comme des stades ou des grandes rues [32]. Elles sont généralement installées par des professionnels de ce fait elles respectent des règles de planification et de partage de ressources contrairement aux cellules femto. Elles communiquent avec le fournisseur de service via la liaison X2 [33].

Les nœuds relai (*Relay Node* RN) peuvent former les HetNets. Ils sont raccordés au réseau cœur d'une manière sans fil qui utilise le même spectre que le système de base. Les RN peuvent se connecter sur la même bande que les usagers; il s'agit d'une communication in-band, sinon si la communication a lieu sur une autre bande elle est dite out-band. Dans ce dernier cas, les RNs ne posent pas des contraintes de déploiement par contre ils demandent plus de spectre dédié pour les communications avec le réseau de raccordement.

Le tableau 4.1 illustre les principales différences entre les nœuds d'un HetNet.

4.1.4 Aspects des réseaux hétérogènes

Dans les HetNets, les techniques de WiFi et les interfaces radio sont combinées dans une même plateforme pour assurer l'évolution de cette nouvelle tendance. Les HetNets fournissent plus de couverture et de capacité mais ils permettent aussi des services à valeur ajoutée en traitant les ressources disponibles sur plusieurs niveaux de couches. Cette nature met les HetNets devant un nombre de défis liés à leur déploiement. Ces défis regroupent principalement l'interférence crée par les nouveaux nœuds, la configuration radio de ces derniers, la mobilité et le handover, la QoS, Par la suite, on va détailler quelques aspects liés au déploiement des HetNets.

4.1.4.1 Configuration radio des HetNets

Dans les réseaux homogènes traditionnels, la configuration des nœuds ou des stations de base suit un modèle prédéfini et standard. Les sites sont manuellement choisis et les stations de base sont bien positionnées en se basant sur des équipements conçus pour la planification radio [32]. Les mobiles contribuent dans les décisions de gestion des ressources exécutées par le réseau en envoyant les rapports en temps réel sur l'interférence, la qualité du canal et les besoins en ressources. Ce modèle centralisé a permis d'assurer une bonne couverture avec une capacité satisfaisante jusqu'à l'introduction des nouvelles applications et services plus exigeant en termes de ressources.

Cette approche traditionnelle n'est pas appropriée dans le cas des HetNets et fait face à plusieurs contraintes. La première contrainte concerne la spécification des sites; on ne parle plus de planification et de position connue des stations. Les mini-cellules sont installées dans des environnements versatiles, comme les résidences, les entreprises, les centres commerciaux, les stades, les stations de métro, ..., et peuvent changer de topologies et de nombres. La deuxième contrainte est liée à la coordination des sous-porteuses et résulte de l'implication directe de l'usager lui-même dans l'installation des cellules résidentielles par exemple. Pour combler ce problème, l'optimisation individuelle du réseau est indispensable pour une bonne gestion des ressources. On parle du SON pour *Self-Organizing Network*. Cette technologie est largement utilisée dans les HetNets avec des détecteurs d'interférence. Dans les systèmes FDD de 3G et 4G, on suggère l'ajout d'un détecteur d'interférence, le réseau est capable de s'auto-configurer en spécifiant l'allocation des canaux, la planification des ressources et les modèles de transmission surtout dans les milieux résidentiels.

Type de couplage	Caractéristiques	Avantages et complexité
Des de courle re		• Aucun changement au réseau existant
r as de couplage	• Coordination de la connexion	• Facturation même en situation hors
	par le gestionnaire du réseau mo-	ligne
	bile	
Couplage large	• Deux réseaux utilisent les	• Pas d'intervention de l'usager pour l'ac-
Couplage large	mêmes ressources usager	cès WiFi
	• Le trafic données acheminé sur	• Le trafic du réseau cœur déchargé via
	différents réseaux cœur	Internet
• Le trafic de l'usager passe à tra		• L'opérateur peut offrir des services à va-
Couplage etroit	vers le réseau cœur de l'opérateur	leur ajoutée
	i.e. les cellules femto	
		• Continuité de service et possibilité de
		handover sans coupure
Couplage très étroit	• Deux réseaux d'accès intercon-	• Implémentation de techniques d'agréga-
Couplage tres etroit	nectés	tion de sous-porteuses et de gestion d'in-
		terférence
	• Gestion de ressources en temps	• Besoin d'efforts de déploiement et de
	réel i.e. les cellules Pico	planification

Tableau 4.2 – Les différents types de couplage dans un HetNet.

4.1.4.2 Coexistence de plusieurs couches

Un HetNet est constitué d'un ensemble de sous-réseaux, ou couches, interconnectés et agissant ensemble. Cette relation peut être étroite quand les réseaux de différentes couches interagissent. Dans ce cas, les flux de données passent d'un réseau à un autre de la même façon pour toutes les couches en cas de handover. Par contre, cette relation est large s'ils fonctionnent indépendamment [32] sans avoir à changer ni leurs architectures ni leurs piles protocolaires. Dans ce cas, le handover provoque un lent temps de latence avant d'effectuer le passage de l'usager d'un réseau à un autre. Il s'agit alors de la façon de couplage des différents réseaux dont le défi est le degré d'intégration entre les différentes entités des couches du HetNet.

Le couplage entre les réseaux constitue un processus complexe qui est fonction, dans un déploiement réel, du compromis entre le coût, la complexité, la performance et la sécurité. Dans certaines situations, le couplage entre les réseaux est une décision prise par l'opérateur selon l'usage potentiel: il permet, par exemple, de gérer la congestion du réseau cœur en réservant une couche aux échanges de données et de voix et une couche à la connexion à Internet. Dans le tableau Tab 4.2, on donne les types de couplage entre les différentes couches d'un HetNet.

Quant à l'industrie, le déploiement avec couplage étroit est le plus attractif vue la simplicité et

l'efficacité d'une connectivité sécurisée continue et la possibilité d'introduire une variété de technologies.

Une fois un HetNet est déployé, l'interfonctionnement entre les différentes couches est une tâche primordiale. Il permet d'assurer l'accès aux services d'une façon flexible et peu complexe. Pour rendre cette tâche aisée, on a pensé à rendre les équipements mobiles plus intelligents et capables de supporter certaines tâches ce qui allège la charge de l'infrastructure du réseau.

4.1.4.3 Handover

Après avoir bien défini la façon de l'interfonctionnement entre les couches du HetNet, il faut assurer le handover soit entre les stations de base soit entre les réseaux. La performance du handover affecte directement l'expérience de l'usager au sein du HetNet comme dans les réseaux homogènes. L'initiation du handover diffère dans un HetNet de celle dans les réseaux homogènes. En effet, dans ces derniers, l'opérateur pourrait initier un handover pour balancer la charge ou quand l'usager quitte la zone de couverture d'une cellule. Cependant, dans HetNet, on a deux types de stations: des stations avec une grande puissance qui supportent de grande mobilité, et des stations à faible puissance qui offrent des coûts faibles pour le téléchargement des données. Si le handover s'effectue dans la même couche, il suit les mêmes étapes que dans un réseau homogène traditionnel. Pour passer à une autre couche, d'autres conditions entrent en considération comme le coût pour l'opérateur de transférer des données, le coût facturable à l'usager, les contraintes en qualité de service et la nature des nœuds des couches en question. Par exemple, il est préférable de transférer un usager en mode téléchargement de données d'une cellule macro à une cellule femto [32]. Dans le cas d'une communication en temps réel, il faut éviter tout handover entre les couches. Il faut aussi considérer le degré de couplage dans la procédure du handover. Dans le cas de couplage très étroit, le handover est toléré.

Dans un HetNet, le déclenchement du handover et la définition de la destination affectent la performance du réseau ainsi que l'expérience de l'usager. Ce-ci est dû au fait qu'en plus des conditions radio qui initient le handover, cette procédure dépend aussi de la politique de l'opérateur, le coût pour l'usager et la qualité de service requise sans oublier la position spatiale de l'usager qui joue un rôle primordial dans l'affectation du mobile à une couche donnée.

4.1.4.4 Assurance de la QoS et de la sécurité

Assurer une certaine QoS dans un réseau mobile est un concept primordial qui devient de plus en plus complexe dans le cas d'un HetNet. Cette tâche fait face à plusieurs défis dont la perception de l'usager qui évalue le service reçu de réussi que s'il bénéficie de la même qualité du début à la fin. Cependant, l'état de la communication ne dépend plus uniquement de la qualité du lien radio mais aussi du réseau dorsal vue la variété des services et des données échangées. Un autre défi est rencontré dans le cas où plusieurs opérateurs interfèrent dans le HetNet et ainsi la traduction de la QoS devrait changer d'un segment à un autre. La garantie de la QoS devient alors plus complexe avec les HetNets à cause de la variable additionnelle de multiples couches ce qui fait de la QoS un élément très délicat dans la gestion des HetNets.

La sécurité est un autre volet d'une importance majeure à assurer dans les HetNets. Vue la croissance rapide des services offert et la prolifération des équipements intelligents, les usagers se trouvent connectés à tout temps et n'importe où, échangeant tout type de données et effectuant tout genre d'applications. Par conséquent, plus Internet est présent dans notre comportement communicatif, plus des mesures de sécurité doivent être adaptées.

Dans les HetNets, ce problème devient plus critique vue que les couches doivent échanger constamment des informations. Dans ce contexte, les industriels responsables de la prolifération des services et des applications circulant sur les réseaux actuels doivent développer plus de techniques et d'applications de sécurité et les intégrer dans les équipements.

4.1.4.5 Interférence radio

Le déploiement des HetNets au sein des systèmes 3G/4G constituait une solution pour répondre aux besoins grandissant en termes de capacité. Cependant, cette solution n'est pas sans inconvénients. En effet, dans un HetNet, les différentes couches de réseaux peuvent partager les mêmes ressources spectrales afin de réduire l'utilisation de fréquences ce qui engendre un problème majeur: l'interférence. Ce problème est d'autant plus exposé dans le cas où les mini cellules sont déployées par l'usager lui même. La coexistence de plusieurs couches de cellules formées par des cellules femto et pico et des relais impliquent de nouveaux scénarios d'interférence où les usagers sont beaucoup plus sensibles surtout que ces cellules sont de tailles et de puissance différentes. Par exemple, dans le cas des cellules femto, un usager connecté à la cellule macro pourrait causer de l'interférence excessive sur la voie montante pour les cellules femto et d'autant plus lorsqu'il est sur les bords de la cellule. Dans ce cas, l'usager macro est dit l'agresseur et la cellule femto est dite la victime.

Étant donné que les ressources spectrales constituent entre autre un souci majeur pour les systèmes de nouvelles générations, la gestion de ces ressources est d'une importance grandissante avec la diversité des entités coexistantes. Plusieurs travaux se font dans ce sens pour améliorer l'expérience des HetNets. De plus, les HetNets font face à de nombreux défis au niveau radio qui doivent être pris en considération dans le développement de nouveaux équipements, dans la planification des ressources, la coexistence de plusieurs standards et technologies, les puissances de transmission et la sensibilité des récepteurs. Les travaux actuels se focalisent sur ces points mais il est nécessaire de travailler sur la distribution de ces tâches entre les équipements du HetNet.

Dans la suite de notre travail, on va détailler les défis des HetNets liés à l'interférence ainsi que les catégories des techniques de gestion. On présentera les techniques existantes pour la gestion de l'interférence et on proposera nos propres stratégies pour faire face à ce problème.

4.2 Avenir des réseaux hétérogènes

Les HetNets ont été conçus pour répondre à la croissance de la demande en terme de capacité et de téléchargement avec l'explosion des nouvelles applications et services qui ont accompagné l'apparition des équipements intelligents. Par conséquent, le succès des HetNets suscite l'amélioration des services offerts.

Dans un HetNet, la connexion à la dorsale est très coûteuse ce qui invite à travailler sur d'autres solutions comme la fibre optique, les mirco-ondes, les multi-relais et les réseaux maillés [32]. Les HetNets devraient incorporer les techniques radio cognitives afin de tirer profit des collaborations entre les équipements.

Comme les HetNets regroupent des couches qui utilisent les interfaces radio de 3G/4G, ils doivent incorporer les techniques d'agrégation de fréquences. Cette technique serait bénéfique par exemple pour éviter un handover où le mobile pourrait attacher le canal primaire de contrôle à une station de base macro opérant à une bande plus basse et de garder le canal données connecté à la mini station opérant avec une bande de fréquence plus élevée pour plus de capacité.

4.3 Performance des HetNets par rapport aux réseaux homogènes

Dans ce chapitre, on a présenté les HetNets ainsi que leur architecture et les différents scénarios de déploiement. Les HetNets ont fait face à plusieurs défis et ont pu répondre aux besoins en capacité. Les HetNets ont constitué une plateforme dans notre travail pour étudier des techniques de gestion de l'interférence dans les systèmes de troisième génération et plus. Dans cette partie, on va décrire le scénario de réseau hétérogène qu'on a utilisé pour notre travail en commençant par définir les différentes entités.

Notre objectif est de montrer l'avantage des HetNets par rapport à un réseau homogène. Par la suite, cette plateforme de HetNet servira pour étudier des techniques de gestion de l'interférence.

4.3.1 Les cellules femto

Dans notre étude, on a considéré un HetNet formé de cellules macro au sein desquelles on déploie aléatoirement des cellules femto. La performance des cellules femto est vérifiée par la loi de Shannon [34]. L'avantage des cellules femto résulte de:

- la faible distance entre la station femto et le mobile ce qui augmente la puissance reçue,
- la faible puissance de transmission de la femto,
- le nombre d'usagers servis par une femto étant faible ce qui permet d'allouer une grande portion des ressources à chaque usager.

Les deux premiers points d'aspects techniques traduisent l'amélioration de la performance due au signal reçu par les usagers se trouvant à l'intérieur et la diminution de l'interférence. Le troisième point est lié au déploiement des cellules femto, à la permission d'accès et à la distribution des ressources parmi les usagers.

Pour répondre à la demande grandissante en capacité, les cellules femto doivent être déployées comme une solution prometteuse en grand nombre au sein de réseaux existants ce qui exige un certain nombre de contraintes:

- permettre de déployer un grand nombre de cellules femto en affectant le moins possible l'architecture existante,
- permettre une connexion sécurisée entre les cellules femto et le réseau cœur via Internet,
- possibilité de configuration à distance.

Dans la norme 3GPP, l'architecture proposée pour les cellules femto respectent ces conditions.

4.3.1.1 Architecture des cellules femto

Dans 3GPP, la station de base d'une cellule femto est appelée *Home Node B* (HNB) pour le système HSPA, et *Home enhanced Node B* (HeNB) pour le système LTE [35]. La HeNB est un équipement usager dans le sens où elle est installée par l'usager au sein de sa résidence /entreprise. Les fonctionnalités et les interfaces du HeNB sont quasiment les mêmes que pour une station de base LTE régulière avec quelques fonctionnalités en plus [35]. Elle supporte ainsi les fonctionnalités du NodeB, station de base macro dans LTE, et du RNC. La HeNB se connecte aux usagers à travers l'interface existante Uu et à la passerelle, HeNB gateway (HeNB-GW), à travers l'interface Iu-h [36]. La HeNB-GW concentre les connexions d'une ou plusieurs HeNB en jouant le rôle d'un RNC. Ce ci permet de connecter un grand nombre de HeNBs sans ajouter ni de nouvelles interfaces ni des fonctionnalités au réseau cœur existant. L'entité qui permet à la HeNB d'exploiter les standards capables de la configuration est la *Home Management System* (HMS). Quant à la sécurité, elle est assurée par la *Security Gateway* (SeGW) qui est basée sur le IPsec. Elle permet d'avoir un lien sécurié entre la HeNB et la HeNB-GW et entre la HeNB et le HMS. Elle est responsable aussi de l'authetification de la HeNB. La figure ci-contre illustre l'architecture d'une HeNB.



Figure 4.2 – Architecture d'une HeNB.

La HeNB fonctionne comme une eNB sauf les exceptions suivantes [9]:

- la découverte de la passerelle HeNB-GW servante,
- à tout instant, une HeNB se connecte à une seule HeNB-GW,
- quand un usager est attaché à une HeNB, la HeNB-GW sélectionne le MME,
- la HeNB peut changer de HeNB-GW dépendamment de sa position qui est assujettie au changement,

- La gestion des ressources radio: le contrôle d'admission, la gestion de la mobilité, l'allocation dynamique des ressources aux usagers,
- L'acheminement des données de l'usager vers la passerelle S-GW,
- La configuration des rapports de mesure de mobilité et d'ordonnancement.

La HeNB-GW constitue une entité spécifique présente avec les HeNBs. Elle assure la fonction d'intermédiaire entre la MME et la HeNB. En effet, la MME voit la HeNB-GW comme une eNB, et la HeNB la perçoit comme une MME. La HeNB-GW permet aussi de déterminer, entre autres, le TAC (*Tracking Area Code*) et PLMN ID (*Public Land Mobile Network IDentifer*) pour le HeNB. La HeNB-GW peut desservir plusieurs HeNBs simultanément.

4.3.1.2 Auto-configuration et standardisation des cellules femto

La gestion de la cellule femto est l'un des principaux changements subis par le réseau mobile existant. D'un point de vue infrastructure, la cellule femto est une extension logique du réseau de téléphonie mobile, et peut donc être considérée parmi les entités à gérer dans le réseau mobile existant. Cependant, elle partage certaines caractéristiques avec les équipements CPE. Par conséquent, des ajustement sont à apporter dans sa gestion [38].

Dans les cellules macro, la planification est d'une grande importance pour gérer les ressources en fréquences, la capacité et l'interférence. Avec les cellules femto, il n'est plus rentable de pré-planifier le déploiement vue le nombre variable de HeNBs à installer. L'auto-configuration est alors la solution qui est très critique vue qu'elle ne permet pas un contrôle préalable de l'interférence.

Les cellules femto ont été définies grâce aux organisations 3GPP et BBF (*Broadband Forum*). Pour assurer la tâche de configuration à distance, on a eu recours à la spécification CPE du *wide area network (WAN) Management Protocol* (CWMP), connue sous le nom TR-069. Ainsi le standard "TR-069" [36] est appliqué aux cellules femto. Il permet l'auto-configuration des cellules femto avec des rapports périodiques.

Le standard "TR-069" a été adapté par le forum femtocells. Il est largement utilisé par le 3GPP/3GPP2 et est caractérisé par [38]:

- un déploiement profitable avec un coût faible,
- des politiques de gestion flexible,
- un protocole de couches supérieures très robuste,
- des services de contrôle diversifiés,

- des mécanismes très extensibles,
- une application avec plusieurs équipements dédiés aux réseaux locaux.

4.3.1.3 Installation des cellules femto

L'installation de la station HeNB est faite par les utilisateurs qui sont dans la plupart du temps des personnes ordinaires. Le processus d'installation doit être simple et automatique avec l'aide de l'opérateur qui doit assurer un support technique pour aider dans l'installation. Il peut y avoir différents types d'appareils pour la connexion à Ethernet soit avec un câble modem soit avec DSL intégré. Comme dans l'installation d'un modem ordinaire, la progression de l'installation est surveillée via des voyants lumineux. Une fois la station femto branchée à Internet, elle doit d'abord déterminer les paramètres appropriés. L'adresse IP et les paramètres du DNS sont obtenus à l'aide du DHCP ou d'autres moyens de négociation automatique. Lorsque ces paramètres sont définis et le backhaul est en fonction, la HeNB doit alors se connecter à l'opérateur de téléphonie mobile. La HeNB doit supporter la découverte automatique du *Home NodeB Management System* (HMS) [39]. Pour assurer une connexion sécurisée, la HeNB se connecte au Se-GW où un tunnel sécuritaire est crée pour les transferts des messages de gestion liés au protocole TR-069. Ce-ci fait, l'opérateur peut transmettre les réglages et les mises à jour nécessaires à la HeNB.

L'opérateur doit se rappeler de la localisation de la HeNB ainsi que de son adresse IP. La HeNB doit assurer les appels d'urgence pour les usagers dans les situations de problèmes.

4.3.1.4 Le contrôle d'accès

Vue que la station femto est la propriété d'un usager privé, elle permet de restreindre l'accès à un groupe de stations mobiles sélectionnées. Ce concept pose certains défis quant aux usagers qui ne parviennent pas à différencier entre une eNB et une HeNB et ainsi à définir s'ils sont autorisés à s'y attacher. L'autorisation de l'accès s'effectue lors de l'enregistrement au réseau [36]. Un usager qui effectue plusieurs essais de connexion non autorisée à une HeNB se voit perdre l'énergie de sa batterie, de plus cet usager prive d'autres usagers de la fréquence qu'il utilise. Cependant, un mobile se trouvant dans une HeNB autorisée se voit sauver de l'énergie. Pour contourner ce problème d'accès, le mobile doit être conscient de la nature des permissions affectées aux HeNBs se trouvant dans son entourage. il doit connaître la liste des HeNBs et leur mode d'accès via des messages échangés sur le réseau.

Une HeNB supporte trois modes d'accès [37] :

- L'accès fermé ou "closed access": dans ce mode, le service est offert seulement pour les membres du groupe CSG qui sont des mobiles autorisés par le propriétaire de la HeNB à se connecter à travers sa cellule femto,
- 2. L'accès ouvert ou "open access": le mode ouvert offre un accès à tout le monde sans restriction. La HeNB sera donc prise pour une eNB. On l'utilise dans des espaces publics pour améliorer la couverture ou la capacité du réseau de l'opérateur comme les centres commerciaux et les stations de métro,
- 3. L'accès hybride ou "hybrid access": dans ce mode, les services sont offerts aux membres du groupe CSG, ainsi que les mobiles non membres de ce groupe, tout en priorisant les membres du groupe CSG comme dans des cliniques, la connexion à travers la cellule femto est offerte en priorité aux employés et aux personnels.

4.3.1.5 Contrôle de la mobilité

La transition des mobiles entre les cellules femto et les cellules macro est très délicate vue la faible étendue et la densité des cellules femto [36]. Le handover et la réélection de cellules doivent être implémentés vers et depuis la femto. En effet, un usager peut changer de cellules très fréquemment ce qui pose un problème quand il est actif ou inactif.

En état inactif, le mobile doit s'enregistrer à l'entrée et à la sortie de la zone desservie par la femto pour assurer la pagination. En mode actif, le mobile confronte le problème d'identification de la cellule cible. Ce-ci est dû au fait que contrairement à la cellules macro, les cellules femto ne possèdent pas de pilotes unique à cause de leur densité. Ce défi est résolu en faisant des mobiles des équipements conscients ou *femto-aware*.

4.3.1.6 Les défis posés par les cellules femto

Le déploiement des cellules femto dans un environnement résidentiel ou professionnel induit plusieurs défis d'ordre techniques, juridiques et économiques. L'un des principaux problèmes liés au cellules femto est la précision du spectre. Afin de respecter les exigences de la Commission Fédérale de Communication (FCC), la cellule femto doit générer un signal hautement précis. Une solution proposée est d'utiliser un signal précis pour calibrer constamment l'oscillateur, le protocole *Network Time Protocol* (NTP) [40] peut remédier à ce problème.

La QoS est un sujet très important pour les cellules femto. En effet, la cellule femto se connecte à l'opérateur via IP qui assure le transfert des données de l'usager à travers le point d'accès vers le réseau de l'opérateur. Cette connexion peut être une liaison ADSL ou une liaison par câble. Au niveau de ce point d'accès d'autres services partagent la bande passante, tels que la consultation de pages webs, des jeux vidéos, TV sur IP, Ainsi, la qualité de service de la communication à travers la cellule femto est compromise, notamment pour le service en temps réel comme la téléphonie. Étant donné le déploiement ad-hoc des cellules femto, leur emplacement et leur localisation constituent un défi pour le réseau qui l'héberge ce qui oblige l'opérateur à mettre à jour constamment les données relatives à la station femto.

4.3.1.7 L'interférence

L'interférence est un obstacle dans les réseaux sans fil qui compromet son étendue et sa capacité, et limite l'efficacité des transmissions. Elle est à l'origine des pertes de paquets, des retransmissions et des retards, par conséquent, elle dégrade la QoS des systèmes mobiles sans fil. Afin d'améliorer la performance du réseau, ses effets doivent être réduits. Les cellules macro sont installées selon un modèle prédéfini: les positions des cellules macro sont choisies selon une planification étudiée par l'opérateur qui spécifie la puissance de transmission, la distance entre les stations macro et le nombre potentiels d'usagers. Cette propriété permet plus ou moins de prédire les scénarios d'interférence et les mécanismes capables de la contourner. Contrairement à ce concept macrocellulaire, les cellules femto sont disposées d'une manière ad-hoc à des distances variables l'une de l'autre et avec un nombre d'usagers généralement imprévisible. Ce-ci fait que les techniques de mitigation de l'interférence dans les HetNets doivent considérer les points suivants:

- dans une cellule femto, le nombre d'usagers est réduit d'où la dégradation de la QoS peut toucher 100% des usagers connectés à la cellule femto,
- la distance entre les cellules femto est non contrôlable vue que ce sont des particuliers qui les installent,
- le standard femto ne spécifie aucun mécanisme de contrôle de puissance des cellules femto ce qui influence l'interférence reçue par les cellules avoisinantes,
- les pertes de chemin, *pathloss*, sont différents de ceux pour les cellules macro.

Les techniques de mitigation de l'interférence avec les cellules femto dans les HetNets restent peu investiguées comme l'annulation de l'interférence et l'évitement de l'interférence [37]. Dans les Het-Nets, les cellules macro et les cellules femto coexistent, l'interférence pourrait dépendre de plusieurs facteurs, tels que la direction du lien radio, la localisation de la cellule femto et le mode d'accès à la cellule. En effet, on distingue trois scénarios d'interférence [37]:

- Mode co-canal: la cellule macro et la cellule femto se partagent la bande de fréquence ce qui cause une interférence macro-femto très importante,
- Mode co-canal partiel: les fréquences sont partitionnées et ainsi les cellules femto et macro se partagent quelques fréquences, dans ce cas aussi l'interférence macro-femto pourrait être importante,
- Mode canal dédié: les cellules macro et femto utilisent des bandes de fréquence différentes. Ce mode permet d'éviter l'interférence au dépend du gaspillage des ressources.

On distingue deux niveaux d'interférence:

- l'interférence *co-tier* lorsque les deux cellules interférantes appartiennent à la même couche du réseau, c'est-à-dire deux cellules macro utilisant les mêmes fréquences,
- l'interférence *cross-tier* lorsque la cellulle victime et la cellule agressante appartiennent à deux niveaux différents, c'est-à-dire dans le cas où le signal descendant de la cellule macro affecte le signal reçu par l'usager desservi par une station femto.

Pour diminuer l'effet de l'interférence, plusieurs techniques sont prises en considération qui peuvent être centralisées ou distribuées. Un système avec une technique de mitigation centralisée est basé sur une entité centrale qui effectue la coordination et la prise de décision. Dans ce cas, l'entité centrale doit recevoir en continu des messages des stations macro et femto ce qui nécessite un échange énorme d'informations comme le nombre d'usagers connectés à la station femto, la qualité du lien et les services. Cette solution parait efficace là où la densité des cellules femto est faible.

Dans une technique distribuée, aucune entité centrale n'est nécessaire; les éléments du réseau s'échangent des données ce qui devient inefficace avec une forte densité de femto.

Une troisième technique de mitigation est l'auto-configuration. Aucun échange n'est nécessaire; la cellule femto utilise quelques données comme l'état du canal. Cette solution ne s'avère efficace que dans le cas d'interférence co-tier.

4.3.2 Évaluation des HetNets par rapport à un réseau homogène

Pour étudier les réseaux hétérogènes, on considère notre plateforme de réseaux LTE homogènes et on y implémente des cellules femto. Cette pratique permet d'évaluer l'impact du déploiement des petites cellules au sein de la structure macrocellulaire existante avant de l'injecter dans une infrastructure réelle. Les éléments décrits précédemment pour un réseau LTE homogène demeurent les mêmes avec l'incorporation d'une couche de cellules femto.

4.3.2.1 Introduction des cellules femto dans le simulateur LTE

Comme on l'a déjà évoqué, les cellules femto sont des petites stations de base à faible puissance et donc à faible portée. L'implémentation physique des femto dans le simulateur suit la même procédure que celle de l'implémentation des stations macro en modifiant les paramètres liés à la puissance, la portée ou la taille et le nombre d'usagers qui lui sont attachés.

Une cellule femto est caractérisée par une couverture circulaire de rayon 20 m, assurée par une antenne omnidirectionnelle de puissance de transmission maximale de 20 dBm. On peuple chaque cellule macro avec un nombre donné de cellules femto. Quant à la nature ad-hoc du déploiement, le simulateur la traduit par une génération aléatoire des cellules femto dans la région de la macro qui les héberge dite cellule macro mère.

Dans notre étude, chaque cellule femto introduite dans une cellule macro supporte un seul usager femto qui se déplace dans un environnement indoor à une vitesse de 3 Km/h. Au cours de la simulation, chaque usager pourrait changer de cellule servante qui lui garantit un meilleur signal. Les paramètres des nouveaux scénarios prenant en compte les cellules femto sont décrits dans le tableau 4.3.

4.3.2.2 Évaluation des HetNets par rapport à un réseau homogène

Les HetNets se montrent très prometteurs en améliorant remarquablement la capacité des systèmes mobiles. Pour étudier leur comportement, on a calculé les débits respectifs obtenus au niveau des cellules femto et des cellules macro ainsi que le débit total. On remarque dans la figure 4.3 que le débit total du réseau augmente avec le nombre de cellules femto. En revanche, le débit des cellules macro se dégrade, étant donné que plus on a de cellules femto plus on a d'usagers qui y sont
Paramètres	Cellule macro	Cellule femto
Fréquence du système	$2{ m GHz}$	
Bande de fréquence	$5\mathrm{MHz}$	
Schéma de cellule	Grille hexagonale de 7 cel-	Cellule circulaire,
	lules,	
	3 secteurs par cellule	1 secteur par cellule
Taille de cellule	250 m	20 m
Modèle de gain d'an-	TS 36.942	Omnidirectionnelle
tenne		
Gain d'antenne Max	15 dBi	0 dBi
Puissance de transmis-	43 dBm	20 dBm
sion Max		
Facteur de bruit du ré-	9 dB	9 dB
cepteur		
Niveau du bruit ther-	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
mique		
Modèle de pathloss	Cost 231 urban macro	Indoor Hotspot
Nombre initial de mo-	25	1 usager forcé
biles		
Vitesse du mobile	30 Km/h	3 Km/h

Tableau 4.3 – Paramètres des simulations au niveau système.

attachés, jusqu'à s'annuler pour 25 cellules femto par cellule macro puisque tous les usagers sont attachés aux cellules femto. En effet, les 25 usagers dans la région de la cellule macro sont attachés aux cellules femto selon le modèle qu'on a adopté où forcément un usager est attaché à une cellule femto.



Figure 4.3 – Comportement d'un réseau HetNet.



Figure 4.4 – Performance d'un HetNet par rapport à un réseau homogène.

57

La figure 4.4 donne le gain obtenu par un HetNet par rapport à un réseau LTE homogène. En effet, on obtient un gain en débit de 50 % pour chaque cellule femto ajoutée. Cette valeur répond bien aux exigences liées à l'introduction des HetNets ce qui valide notre étude.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les HetNets dans LTE et leur implémentation par l'insertion de cellules femto dans un réseau LTE existant en utilisant notre plateforme du simulateur LTE décris dans le chapitre 3. On a montré, grâce aux simulations au niveau système, que les HetNets LTE permettent de fournir de meilleurs services aux usagers mobiles. Les cellules femto introduites offrent en plus d'une meilleure couverture, des débits dépassant les débits dans un réseau LTE homogène. Par conséquent, on conclut que les HetNets parviennent à satisfaire les exigences des systèmes IMT-Advanced. Cependant, le déploiement de cellules femto introduit des problèmes tel que l'interférence qui provoque une dégradation des performances du réseau et compromet ainsi son bon fonctionnement. C'est dans le chapitre suivant qu'on étudie de près ce problème en proposant des stratégies de mitigation de l'interférence.

Chapitre 5

Nouvelles techniques de modération de l'interférence dans les HetNets

Introduction

Le déploiement de nouvelles cellules femto dans les réseaux mobiles conventionnels a permis d'améliorer l'efficacité spectrale des réseaux mais a certes introduit des problèmes liés à l'interférence. En effet, les couches macro et femto reçoivent de l'interférence mutuellement ce qui dégrade la performance souhaitée des réseaux HetNets d'autant plus que les opérateurs radio ont opté pour une allocation co-canal de ressources [48]. Pour résoudre ce problème, certaines techniques de gestion d'interférence ont été proposées. Ces techniques sont généralement basées sur les principales méthodes suivantes [55]:

- décoder l'interférence, dans le cas d'une interférence importante, pour avantager le signal utile,
- considérer l'interférence comme du bruit, dans le cas d'interférence faible, ce-ci permet d'utiliser un simple codage/décodage pour un seul usager,
- utiliser un mode d'accès orthogonal au canal quand l'interférence et le signal utile ont le même ordre ce qui permet d'éviter l'interférence entre les systèmes sans fil co-existants.

Cependant, ces techniques restent valables pour un nombre restreints d'usagers. Certaines techniques n'étaient validées théoriquement que récemment et leur application n'émanent que d'un point de vue ingénierie. Partant de ces principes, la littérature a développé l'alignement d'interférence, l'évitement d'interférence et l'annulation d'interférence.

Dans notre travail, on s'est intéressé aux techniques d'annulation et d'évitement d'interférence. On procédera dans la suite par décrire quelques techniques existantes, ensuite, on va proposer des techniques de gestion d'interférence valables pour les systèmes LTE. On évaluera ces propositions par comparaison avec des techniques existantes.

5.1 Techniques de gestion de l'interférence inter-cellules dans les systèmes LTE-Advanced

Le déploiement des cellules femto est accompagné de plusieurs défis techniques mais aussi de problèmes concernant la gestion et l'évitement des interférences; on parle de techniques de la coordination de l'interférence entre les cellules ou *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC). Un réseau HetNet composé de deux couches de cellules est confronté ainsi au problème de gestion de ressources, temporelles, spatiales et fréquentielles, pour contrôler l'interférence. Dans un HetNet, on rencontre deux niveaux d'interférence [49]: l'interférence entre les différentes couches ou *cross-tier interference* qui est perçue par un élément d'une couche et issue par un équipement d'une autre couche, et l'interférence au sein de la même couche de cellules ou *co-layer interference*. Cette dernière met en jeu les éléments de la même couche.

Pour étudier les techniques de coordination d'interférence dans les HetNets, on commence par considérer les techniques conventionnelles de contrôle d'interférence appliquées dans les réseaux homogènes.

5.1.1 Alignement d'interférence

La technique d'alignement d'interférence a été proposée pour séparer les signaux interférants du signal désiré. Il s'agit de regouper tous les signaux interférants dans un même espace, le reste de l'espace étant réservé pour recevoir le signal utile. Dans [55], l'auteur a présenté le concept de degrés de liberté dans un système sans fil comme étant le nombre de chemins du canal ne causant pas d'interférence au niveau du récepteur en question. L'idée est de réaliser le plus grand nombre de degrés de liberté avec l'alignement d'interférence et ainsi augmenter la capacité du réseau sans fil. On présente ici trois différentes techniques d'alignement: l'alignement par choix de coefficients de canal, l'alignement par choix de délai de propagation et l'alignement par précodage.

Dans le premier cas, l'alignement de l'interférence est assuré si le canal est connu. Pour un nombre total d'usagers K, chaque usager assure $\frac{K}{2}$ degrés de liberté.

Dans le second cas d'alignement, on considère les délais de propagation qui existent entre les différents noeuds émetteurs et récepteurs pour séparer l'interférence du signal utile. Dans la configuration des localisations, on suppose que le délai entre l'émetteur et son récepteur désiré est un multiple pair de la durée du symbole. Un signal interférant est reçu avec un décalage multiple impair de la durée du symbole. Ainsi chaque usager effectue la moitié des degrés de liberté en ne considérant que le signal arrivant sur un délai pair. Au total, le nombre de degrés de liberté est $\frac{K}{2}$.

Etant donné que les coefficients du canal ne sont pas contrôlés et sont générés aléatoirement, pour aligner l'interférence dans cette situation, seul le précodage le permet [55]. Le nombre total de degrés de liberté est donné selon l'équation suivante:

$$\max_{d \in D} d_1 + d_2 + \dots + d_K = \frac{K}{2},$$

où D est la région de l'ensemble des degrés d_k de liberté pour tous les usagers.

À la transmission, les symboles sont codés par un vecteur pour contrôler la direction de tous les signaux. À la réception, on décode les signaux reçus en forçant à zéro les vecteurs de codage là où les indices ne correspondent pas au signal utile. Les vecteurs de codage sont choisis de sorte que le récepteur force à zéro les signaux interférants venant des autres émetteurs.

Ces techniques d'alignement d'interférence, appliquées aux réseaux homogènes au début, sont très robustes. Par la suite, elles ont été étendues pour les HetNets [57, 58].

Généralement, les techniques de IA sont appliquées en supposant une connaissance parfaite du canal par les émetteurs et les récepteurs pour pouvoir aligner convenablement l'interférence au niveau du récepteur désiré. Dans d'autres schémas, il suffit d'avoir les informations locales sur le canal [59]. D'autres techniques sont aveugles et ne considèrent aucune connaissance du canal et prennent comme hypothèse les différentes corrélations entre l'émetteur et le réceptur.

5.1.2 Techniques d'évitement d'interférence

Dans les systèmes sans fil, les usagers qui se trouvent proches de la station de base servante expérimente un SINR assez élevé, par contre, les usagers se trouvant sur la bordure de la cellule souffrent de SINRs très faibles. La réutilisation de fréquences est une technique statique d'évitement d'interférence. Cette technique peut assurer l'orthogonalité entre les bandes existantes en partageant bien le spectre entre le centre de la cellule et ses bords.

Pour analyser la performance de la technique de réutilisation de fréquence, il faut calculer l'éfficacité spectrale qui dépend du facteur de réutilisation. Ce facteur agit également sur l'amélioration du SINR et de la capacité en fonction de la position du mobile dans la cellule. En effet, un mobile sur le bord de la cellule bénéficie beaucoup plus qu'un mobile se trouvant au centre. Autrement, seuls les mobiles au bord de la cellule vont noter une amélioration très importante vue que leurs SINRs étaient faibles par rapport à une légère amélioration du SINRs des mobiles centraux, ces derniers ayant des SINRs élevés avant la réutilisation de fréquences [51].

Plusieurs variantes de réutilisation de fréquence ont été abordées dans la littérature en variant les facteurs de réutilisation des fréquences entre le centre de la cellule et ses bords. Le concept de réutilisation de fréquences permet de réduire l'interférence perçue par les usagers se trouvant sur les bords de la cellule. Il s'agit d'allouer différentes sous-bandes pour les bords voisins [52] d'où on parle de réutilisation fractionnelle de fréquences ou *Fractional Frequency Reuse* (FFR). La figure 5.1 donne un exemple de schémas de partage de fréquences. La réutilisation des fréquences est supportée par l'ordonnaceur qui peut ainsi considérer les bandes disponibles pour l'allocation des ressources. Les schémas d'allocation avec un facteur égal à 1 au centre et un facteur n > 1 sur les bords sont les plus performant en termes de réduction de l'interférence et d'amélioration de l'efficacité spectrale. Ces techniques basée sur la réutilisation de fréquence sont relativement faciles à implémenter car elles ne demandent pas une interaction fréquente entre les différents noeuds concernés. Cependant, la nature statique de cette technique, une fois ce schéma d'allocation mis en place, fait qu'il n'est plus facile d'apporter des changements sur les distributions de fréquences et ce-ci ne permet pas l'adaptation aux changements dynamiques de la demande liée à la charge de la cellule ni à l'état du canal vu par les sous-porteuses.

Pour remédier à cette faiblesse, les techniques de coordination entre les différentes cellules et les mobiles sont introduites. Le contrôle de la puissance est considéré comme l'une des techniques d'évitement de l'interférence avec coordination entre les stations de base [53]. Il s'agit d'une technique importante permettant avec la réutilisation de fréquences de réduire considérablement l'interférence. Dans le LTE, une technique de contrôle de puissance fractionnelle est utilisée afin de maintenir un niveau d'interférence cible en compensant la perte de la capacité totale dûe à la perte du canal. Plusieurs techniques d'évitement seront décrites plus loin dans ce chapitre.



Figure 5.1 – Réutilisation de fréquences.

5.1.3 Techniques d'annulation d'interférence

L'annulation d'interférence est considérée comme une technique d'évitement basée sur la détection du signal non utile et sa déduction au niveau du récepteur. On trouve l'annulation successive et l'annulation parallèle d'interférence.

Dans l'annulation successive, un décodeur est utilisé pour séparer le flux de données désiré du signal reçu combiné de la superposition de tous les signaux destinés à plusieurs usagers [54]. Ensuite, ce flux décodé est substitué au signal initial. Ces deux tâches sont répétées jusqu'à ne plus avoir d'interférence à annuler pour tous les usagers.

L'annulation en parallèle estime et déduit le signal interférant estimé de tous les usagers en même temps. Il s'agit d'un processus en parallèle qui permet d'annuler complètement toute l'interférence vue par chaque usager.

Dans notre travail, on va présenter une nouvelle technique d'annulation d'interférence dans les HetNets.

5.1.4 Gestion de l'interférence dans les HetNets

Le défit principal dans un réseau HetNet est l'interférence entre les cellules macro et les cellules femto, ce qui contraint le gain en performance apporté par la réutilisation de fréquences. Ainsi, des techniques d'évitement ou d'annulation d'interférence sont considérées pour compenser cette perte dans les HetNets [60, 61]. Ces techniques ont été proposées dans le cadre du projet 3GPP pour traiter les ICI dans les HetNets. Des méthodes évoluées de gestion de l'interférence ont alors été déployées qui profitent de la nature des technologies LTE. On parle de *enhanced Inter-Cell Interference Coordination* (eICIC) [62].

Ces techniques sont présentées sous forme de trois catégories:

- les techniques du domaine temproel,
- les techniques du domaine fréquentiel,
- les techniques de contrôle de puissance.

Dans chaque catégorie, on trouve certaines techniques où chacune exploite une caractéristique des technologies LTE et une ressource bien particulière. Le schéma suivant, dans la figure 5.2, présente un apreçu des différentes techniques et les composantes qu'ellse mettent en jeu dans la structure de ressources LTE.

Les techniques de coordination dans le domaine temporel utilisent les ressources temporelles telles que les sous-trames et les symboles OFDM [63]. Le principe de ces techniques est de créer des sous-trames où les victimes seraient protégés des éventuels agresseurs. Parmi ces techniques, le *subframe alignment* ou l'alignement de sous-trames permet d'éviter l'interférence en alignant la transmission des données et de la signalisation des cellules macro et des cellules femto, respectivement. Dans cette catégorie, on trouve le "Almost Blank Subframe" (ABS) où la station de base ne transmet ni des données ni de la signalisation, seuls les symboles de référence sont transmis sur quelques blocs de ressources [64]. Dans une autre variante de ABS, l'agresseur peut émettre mais avec une puissance réduite. Une autre catégorie de techniques du domaine temporel consiste à décaler la transmission des cellules femto de quelques symboles OFDM par rapport à la cellule macro [63].

Pour les techniques du domaine fréquentiel, les canaux physiques et de contrôle sont planifiés dans des bandes de fréquences plus petites de sorte à assurer l'orthogonalité ou encore les cellules macro ou femto utilisent différentes sous-bandes de fréquences. Ces techniques peuvent être statiques ou dynamiques.

Dans la troisième catégorie, la puissance de transmission des cellules femto est réduite afin de



Figure 5.2 – Techniques de eICIC dans les HetNets LTE.

minimiser l'impact de l'interférence sur les usagers attachés à la cellule macro [65]. La réduction de la puissance peut être réalisée suite à des mesures retournées par les cellules femto ou par l'exploitation de la signalisation en backhaul avec les stations macro.

Les techniques eICIC mettent les émetteurs et les récepteurs en jeu pour exploiter les informations collectées ou échangées sur l'état du canal afin de bien gérer les ressources disponibles et les répartir convenablement en temps, en espace et en fréquence.

Dans ce chapitre, on va présenter et étudier certaines techniques de mitigation de l'interférence pour les HetNets LTE. Pour ce faire, on a considéré des techniques d'annulation et d'évitement d'interférence. Notre objectif est d'assurer une meilleure performance dans les HetNets en combinant ces deux catégories. Cette combinaison se montrera bénéfique en termes de capacité et de complexité.

5.2 Proposition de techniques de modération de l'interférence dans les HetNets

La réduction de l'interférence dans les HetNets est un sujet d'actualité vue l'importance de l'introduction de nouvelles cellules de petite portée dans l'extension de la couverture mais aussi vue l'apparition de nouveaux enjeux. En effet, la nouvelle structure implique de nouveaux problèmes dont l'interférence crée par les deux couches et contraignant la performance du système. Plusieurs techniques ont été étudiées dans la littérature et d'autres proposées par l'organisme 3GPP. Dans notre travail, on a considéré un HetNet formé de cellules macro et de cellules femto qui constituent notre scénario d'interférence en lien descendant.

Pour améliorer la capacité de notre système, on propose une combinaison de technques d'évitement et d'annulation d'interférence. L'idée de combiner ces deux techniques émane, en premier lieu, de notre connaissance de techniques impliquant les deux côtés, à savoir l'émetteur et le récepteur. Comme on l'a évoqué plus haut, l'alignement d'interférence est une technique très robuste qui traîte l'interférence en impliquant l'émetteur et le récepteur. À l'émission, on code les symboles à transmettre pour les aligner dans un espace séparant le signal désiré des signaux interférants. Au niveau du récepteur, une annulation d'interférence est souvent indispensable. En plus de mettre les deux côtés en jeu, ces deux derniers doivent communiquer pour générer les vecteurs de codage. Cet aspect rend l'alignement d'interférence très coûteux en ressources. De plus, dans notre travail, l'AI est très complexe à implémenter à cause de la structure en sous-porteuses et la densité en nombre de couples émetteur/récepteur au niveau système. Cependant, son implémentation est faisable au niveau lien comme le cas de [56].

En second lieu, notre proposition provient de notre manipulation de ces deux variantes séparémment. En effet, dans le cadre de notre travail, on a étudié des techniques d'évitement et d'annulation qu'on détaillera dans ce qui suit. On a pu ainsi, tout au long de notre étude, connaître leurs avantages et leurs faiblesses pour aboutir à l'idée de les combiner afin de combler les faiblesses de l'une par les points forts de l'autre.

Les techniques d'évitement et d'annulation d'interférence sont toutes prometteuses avec une amélioration de la capacité. Cependant, la première est moins performante mais moins complexe que la deuxième, ce qui constitue une issue de sortie pour réaliser un certain compromis entre la performance et le coût. Cette balance nous mène vers une meilleure performance.

Pour montrer la réalisation de ce compromis, on va détailler chacune de nos deux propositions à part et les évaluer pour s'arrêter sur les bénéfiques de la combinaison. Ces deux techniques d'évitement d'interférence du domaine temporel, LP-ABS, et d'annulation d'interférence, DL-IC, seront détaillées dans les sous-sections suivantes avant de présenter les avantages de leur combinaison.

Pour présenter ces deux techniques, on considère un environnement multi-couches multi-usagers avec un ensemble \mathcal{L} d'usagers mobiles. Chaque usager $u \in \mathcal{L}$ est sujet à une interférence sur lien descendant qui provient de l'ensemble des cellules voisinantes à sa cellule servante noté J_u . Dans notre modèle de système, chaque usager u calcule son SINR pour un bloc de ressources RB à chaque TTI. L'expression du SINR, $\gamma_{u,r}$, est donnée par:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}}$$
(5.1)

avec $P_{u,i(u),r}$ est la puissance reçue dans le RB r de la part de la cellule servante i(u), $P_{u,j,r}$ est la puissance reçue de la part de la cellule voisine interférante $j \in J_u$ au même RB r et au même TTI, et $\sigma_{u,r}$ est la puissance du bruit Gaussien reçu par l'usager u.

5.2.1 L'annulation d'interférence sur le lien descendant DL-IC

L'annulation d'interférence est une technique très robuste pour améliorer le SINR en réduisant l'effet de l'interférence perçue par le mobile. Dans nos travaux, on a proposé une technique d'annulation d'interférence, DL-IC pour *Downlink Interference Cancellation*, pour notre système LTE appliquée au HetNet avec un spectre partagé entre les cellules macro et femto.

Notre principe est d'annuler les signaux interférant au niveau du récepteur mobile. Autrement, l'usager doit annuler le terme correspondant à l'interférence reçue dans l'expression de l'équation 5.1. Ainsi, le terme $\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r}$ doit être minimisé en considérant des coefficients d'annulation servant à multiplier les signaux interférents par des taux compris entre 0 et 1. Ces coefficients, notés $a_{u,j,r}, (j \in J_u)$, réduisent les puissances interférentes reçues.

Suite à cette manipulation, le SINR reçu résultant après annulation, dit SINR post-IC, est donné par:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} (a_{u,j,r} \times P_{u,j,r}) + \sigma_{u,r}}.$$
(5.2)

L'objectif du DL-IC est de calculer les $a_{u,j,r}$, $(j \in J_u)$ optimaux qui permettent d'améliorer le SINR et ainsi la capacité du système. Pour ce faire, on a optimisé les coefficients de façon à maximiser le SINR de l'usager en se basant sur le concept de maximisation des fonctions d'utilité [76]. Ces fonctions d'utilité utilisées dans [76] n'ont, à notre connaissance, jamais été exploitées dans le contexte de HetNet basé sur OFDM.

Dans cette approche, on cherche à calculer les coefficients d'annulation optimaux. En effet, la maximisation de la fonction d'utilité permet la sélection des signaux interférants à annuler et la détermination du taux optimal d'annulation pour chaque signal interférant. Ainsi, chaque usager définit une fonction d'utilité nette, $U_{net,u}$ à maximiser. Cette fonction se présente, pour une station de base dans un réseau cellulaire, comme la combinaision d'une fonction d'utilité notée U_u traduisant le degré de satisfaction du client, et d'une fonction de coût, C_u , traduisant le coût de cette satisfaction. L'expression de la fonction d'utilité nette $U_{net,u}$ est la suivante:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = U_u(\gamma_u) - C_u(\gamma_u).$$
(5.3)

Sachant qu'une annulation parfaite d'interférence $[a_{u,j,r} = 0 \ (j \in J_u)]$ est pratiquement non réalisable et exige une forte complexité de calcul, on introduit une fonction de coût qui traduit les imperfections dûes aux erreurs d'annulation et à la complexité de calcul. La fonction C_u permet donc de concevoir une stratégie d'annulation efficace et réalisable. Pour cette raison, on utilise la même fonction de coût pour chacun des usagers définie comme suit [78]:

$$C_u(\gamma_u) = \beta \gamma_u, \tag{5.4}$$

 β étant le paramètre de coût à déterminer.

Pour calculer les coefficients d'annulation optimaux, il faut maximiser le SINR post-IC, $\hat{\gamma}_u$, qui est exprimé, après dérivation de la fonction d'utilité par rapport au SINR γ_u , sous forme de:

$$\frac{dU_{net,u}(\gamma_u)}{d\gamma_u} = U'_u(\hat{\gamma}_u) - \beta = 0 \qquad \Longleftrightarrow \qquad \hat{\gamma}_u = U'_u(\beta). \tag{5.5}$$

Et par la suite, en utilisant l'expression du SINR optimal, on obtient la condition et l'expression du coefficient $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$, respectivement, comme:

$$\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{U'_u(\beta)} - \sigma_{u,r},$$
(5.6)

 et

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{P_{u,i(u),r}}{U'_u^{-1}(\beta)} - \sigma_{u,r} \right].$$
(5.7)

 j_u est le nombre de cellules interférantes $[j_u = card(J_u)]$ avec card est la cardinalité de l'ensemble J_u .

Pour différencier les usagers femto des usagers macro, on leur attribue deux fonctions d'utilité différentes et ainsi des coefficients d'annulation distincts [75]. Analytiquement, on attribut à l'usager

macro, $u \in \mathcal{L}_m$, sa fonction d'utilité notée $U_{m,u}$ comme suit [79]:

$$U_{m,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)}$$
(5.8)

où \mathcal{L}_m est l'ensemble des usagers macro et α_m un paramètre qui contrôle la pente de la fonction d'utilité. La fonction d'utilité nette est alors obtenue sous l'expression suivante:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} - \beta_m \gamma_u$$
(5.9)

où β_m correspond au paramètre β pour l'usager MUE. Les coefficients d'annulation pour les usagers macro sont donnés par:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[-\frac{\alpha_m}{\ln(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1})} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right].$$
 (5.10)

De la même façon, on définit la fonction d'utilité, $U_{f,u}$, pour l'usager femto, FUE, $u \in \mathcal{L}_f$, sous la forme suivante [79]:

$$U_{f,u}(\gamma_u) = W \log(1 + \gamma_u) \tag{5.11}$$

où W représente la bande de fréquence du système.

La fonction d'utilité nette pour un usager femto est la suivante:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = W \log(1+\gamma_u) - \beta_f \gamma_u \tag{5.12}$$

En utilisant toutes les expressions obtenues, les coefficients d'annulation pour un usager femto sont donnés par:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{\beta_f}{W - \beta_f} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right].$$
(5.13)

Pour avoir les détails du calcul, le lecteur doit se référer à [77]. Plusieurs évaluations ont été encourues pour calibrer les paramètres dont dépendent les fonctions d'utilité et ainsi les coefficients d'annulation. Ces paramètres sont α_m , β_m et β_f . Dans ce travail, on va considérer les valeurs de ces paramètres qui ont donné la meilleure performance.

Vue qu'on ne pourrait pas avoir une annulation parfaite, on a suggéré d'optimiser notre méthode et réduire sa complexité. Dans un premier temps, on limite les valeurs des coefficients d'annulation entre une borne inférieure notée A_l et une borne supérieure notée A_u qui reflètent le nombre de signaux interférant à annuler. Ces deux bornes s'interprètent selon les conditions suivantes:

• les signaux interférants ayant des coefficients d'annulation supérieures à la borne A_u ne seront pas annulés:

Si
$$a_{u,j,r} > A_u$$
 alors $a_{u,j,r} = 1$, $j \in J_u$ et $u \in \mathcal{L}$

• vue les imperfections lors du calcul des taux d'annulation, les signaux interférants ne peuvent pas être annulés totalement avec des coefficients nuls:

$$a_{u,j,r} = \max(A_l, a_{u,j,r}), \quad j \in J_u \quad \text{et} \quad u \in \mathcal{L}$$

Une annulation parfaite correspond à $A_l = 0$ et $A_u = 1$. Le choix de A_l doit permettre de s'éloigner le plus du cas parfait tout en gardant une bonne performance sans une dégradation remarquable par rapport au cas idéal. Pour pousser encore plus loin l'optimisation de notre stratégie d'annulation, on a introduit une troisième dimension qui est le nombre de contraintes d'annulation N_c . Il s'agit de spécifier le nombre de signaux interférants à annuler ce qui réduit le calcul et ainsi la complexité de l'algorithme. Ce nombre trop petit pourrait dégrader dramatiquement la performance. Si on le choisit trop grand, il augmente le coût du processus d'annulation. Un choix judicieux s'impose afin de réaliser un compromis entre la complexité et le résultat de la solution idéale. On a pu déterminer le comportement de ces dimensions suite à des simulations. Cette approche substitue le besoin de la borne supérieure étant donné que, dans la nouvelle approche, les N_c signaux les plus interférants correspondant aux N_c coefficients les plus faibles sont les seuls à être annulés.

Dans notre travail actuel, on garde la dernière version de DL-IC à savoir celle avec une borne inférieure pour s'éloigner du cas idéal, et on considère les contraintes d'annulation afin d'étudier le comportement des deux techniques conjointes et trouver la combinaision donnant un compromis entre performance et complexité.

5.2.2 La stratégie LP-ABS proposée

Dans notre approche pour améliorer la capacité des HetNets, on a opté pour des techniques de gestion de ressources pour contrer les problèmes liés à l'interférence. Comme technique de gestion de ressources temporelle, on présente ici la LP-ABS, pour *Low Power Almost Blank Subframe*, qui hérite du ABS standard décrit plus haut. Cette technique a été proposée depuis la *Release 10* du projet 3GPP/LTE. Dans cette stratégie, les stations de base agresseurs doivent restreindre leur transmission durant une certaine période de temps traduite en fonction d'une fraction de soustrames. En effet, la stratégie ABS, en général, permet de réarranger les ressources disponibles dans le temps, en d'autres termes, il s'agit de gérér l'utilisation des blocs de ressources différemment d'un slot de temps à un autre [66].

Durant les sous-trames muettes dites ABS, la transmission de données est stoppée afin de réduire l'impact de l'interférence sur les usagers victimes. Ainsi, l'absence de transmission de données équivaut à transmettre avec une puissance nulle, d'où l'appelation de sous-trames muettes ou *nulled subframes*. Cependant, la transmission n'est pas quasiment nulle vue qu'il existe toujours des signaux à transmettre pour ne pas interrompre la connexion au lien radio et garder un feedback sur le canal pendant cette durée. Ces signaux sont les symboles de références, Common reference symbols (CRS), les signaux de synchronisation primaires et secondaires (PSS and SSS), les signaux physiques comme le Physical broadcast channel (PBCH) et les signaux de pagination [67].

Contrairement à ce principe des sous-trames nulles, 3GPP vient proposer dans la *Release 11* une nouvelle variante de ABS avec une transmission de données à une puissance réduite d'où l'appelation *Low-Power* ABS (LP-ABS) [68, 69].

Des travaux sur cette variante sont toujours en évolution avec les travaux déjà proposés dans le cadre du projet 3GPP [70, 71, 72, 73]. Dans notre cas, on considère LP-ABS pour les HetNets dans le scénario macro/femto évalué dans le chapitre 4. Dans notre approche, on choisit comme station de base agresseur la cellule macro vue sa grande puissance de transmission comparativement à la puissance faible des stations femto. Les usagers attachés à la cellule femto reçoivent constamment des données de la station servante avec la puissance maximale qui lui est permise. Les cellules macro transmettent avec une puissance réduite selon un modèle et une fréquence données qu'on a proposés dans notre stratégie LP-ABS. Pour ce faire, on considère une périodicité et un taux qui définissent le modèle de gestion de la transmission de données. La période, T_{ABS} , est la portion de sous-trames parmi le nombre total de sous-trames disponibles durant lesquelles on va considérer un taux déterminant le nombre de sous-trames où la puissance devrait être réduite. Ce taux est le facteur F_{ABS} qui définit la fraction de sous-trames LP-ABS parmi les T_{ABS} sous-trames. Autrement, sur un nombre total de sous-trames, après chaque T_{ABS} sous-trames, on applique la réduction de puissance sur les premières $T_{ABS} * F_{ABS}$ sous-trames. La figure 5.3 illustre le modèle de sous-trames LP-ABS.

Durant les sous-trames *LP-ABS*, la puissance de transmission des stations macro est réduite dynamiquement en fonction de l'état du système pendant les sous-trames précédentes et l'interférence reçue. En effet, à la fin de chaque sous-trames, l'usager transmet un feedback à la station de base sous forme de CQI (*Channel Quality Indicator*) qui indique le schéma de modulation et de codage utilisé (MCS) par chaque RB au TTI précédent. Dans LTE, quinze CQIs sont utilisés allant de 1 à 15 divisés en trois groupes représentant chacun un intervalle de SINRs correspondant en fait à un MCS donné. Ainsi, chaque SINR mesuré est traduit en CQI et par conséquent translaté en un MCS.

Ces MCSs traduisent l'état du canal vu par l'usager en question. Dans notre stratégie, la station de base garde le CQI maximal, CQI_{max} , et le CQI minimal, CQI_{min} , de tous les CQIs envoyés par les usagers qui lui sont attachés. Ces deux variables permettent à la station de base d'ajuster sa puissance de transmission dépendemment de l'interférence perçue par le canal et de son état. Notre objectif est de réduire la puissance de transmission de la station macro afin de diminuer l'impact de l'interférence sur les usagers femto sans compromettre sa QoS. L'expression de la puissance au



Figure 5.3 – Illustration du schéma de séparation des sous-trames LP-ABS sur une période T_{ABS}.

niveau des sous-trames *LP-ABS* est ajustée selon l'interférence reçue; quand le MCS est élevé, la station macro doit transmettre avec une puissance assez importante et ainsi sa puissance n'est réduite que d'une faible valeur. Par contre, quand le CQI reçu est faible, la modulation faible est non sensible à l'interférence et la puissance de transmission pourrait être considérablement réduite sans nuir à la qualité de service rendu [74].

Dans ce qui suit, on associe à chaque groupe de CQIs, CQI_{int} , autrement à chaque MCS, une fraction, $P_{soustraire}$, à soustraire de la puissance maximale permise de la station de base agresseur. Il s'agit alors de traduire chaque CQI reçu en une valeur en se référant à une table de correspondance (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 – Correspondance entre le CQI et la puissance à soustraire dans la stratégie LP-ABS.

$$\begin{split} \mathbf{P} &= [\mathrm{P1} \ \mathrm{P2} \ \mathrm{P3}];\\ CQI_{int} &= [1\ 2\ 3]\\ P_{soustraire}(CQI_{int}(cqi)) = \mathbf{P}(CQI_{int}(cqi))\\ \Rightarrow\\ \mathrm{si} \ \mathrm{CQI} \ \mathrm{appartient} \ \mathrm{\dot{a}}\ (1:6),\\ CQI_{int}(cqi) &= 1, \ \mathrm{relative} \ \mathrm{\dot{a}}\ \mathrm{la}\ \mathrm{modulation}\ \mathrm{QPSK},\\ P_{soustraire}(1) &= P1\\ \mathrm{sinon}\\ \mathrm{si}\ \mathrm{CQI} \ \mathrm{appartient} \ \mathrm{\dot{a}}\ (7:9),\\ CQI_{int}(cqi) &= 2, \ \mathrm{relative} \ \mathrm{\dot{a}}\ \mathrm{la}\ \mathrm{modulation}\ 16\ \mathrm{QAM}\\ P_{soustraire}(2) &= P2\\ \mathrm{sinon}\ (\mathrm{CQI}\ \mathrm{appartient}\ \mathrm{\dot{a}}\ (10:15)),\\ CQI_{int}(cqi) &= 3, \ \mathrm{relative}\ \mathrm{\dot{a}}\ \mathrm{la}\ \mathrm{modulation}\ 64\ \mathrm{QAM}\ .\\ P_{soustraire}(3) &= P3 \end{split}$$

Après avoir obtenu les CQI_{min} et CQI_{max} , la station de base doit ajuster sa puissance de transmission, $eNodeB_{power}(s)$ où s est le secteur servant parmi les trois secteurs, si la sous-trame courante est une *LP-ABS*. Notre expression proposée de réduction de la puissance au temps de la *LP-ABS* est comme suit:

$$eNodeB_{power}(s)(dBm) = \max(P_{min}, \min(P_0 + P_{offset}, P_{max})) - P_{soustraire}(CQI_{int}^{min}(s))$$
(5.14)

Les différentes variables dans l'équation sont définis par:

 $eNodeB_{power}(s)$ est la nouvelle puissance calculée dynamiquement par la station de base pour le secteur s,

 P_{max} :

$$P_{max} = 10 * log10(eNodeB_{power}^{tx}) + P_{soustraire}(CQI_{int}^{max}(s)),$$

 P_{min} ,

$$P_{min} = 10 * log10(eNodeB_{power}^{tx}) - P_{soustraire}(CQI_{int}^{min}(s)),$$

 $eNodeB_{power}^{tx}$ est la puissance maximale permise à la station de base macro, P_0 (l'interférence reçue):

$$P_0 = 10 * log10(eNodeB_{interf}(s)) + P_{soustraire}(CQI_{int}^{max}(s)),$$

 $eNodeB_{interf}(s)$ est l'interférence reçue à partir des stations macro et femto voisinantes, et P_{offset} est l'évanouissement du canal entre la station de base et l'usager en question:

$$P_{offset} = 10 * log10(eNodeB(s)_{macroscopic_pathloss}),$$

 $eNodeB(s)_{macroscopic_pathloss}$ est la dégradation du canal, et enfin:

$$CQI_{int}^{min}(s) = CQI_{int}(CQI_{min}(s))$$
$$CQI_{int}^{max}(s) = CQI_{int}(CQI_{max}(s)).$$

Cette expression permet de réduire la puissance de transmission de la station de base dynamiquement tout en s'adaptant à l'état du canal et à l'interférence. En effet, on essaie de compenser la perte due à l'interférence et on réduit la puissance permise selon le MCS en respectant la sensibilité à la puissance de transmission [74].

Cette technique d'évitement d'interférence va être évaluée par la suite quand elle est appliquée seule et aussi combinée avec DL-IC.

5.2.3 Combinaison de DL-IC et LP-ABS: MUCICA

Dans ce travail, on a proposé deux techniques de réduction d'interférence: une technique d'annulation au niveau du récepteur et une technique d'évitement au niveau de l'émetteur. La première stratégie DL-IC est très efficace mais complexe à implémenter puisqu'elle impose des contraintes d'annulation donc plus de charge de calcul imposée au récepeteur. Ce-ci nous amène à considérer une stratégie qui conserve les avantages de DL-IC mais en même temps réduit sa complexité. Pour ce faire, on a considéré les techniques d'évitement d'interférence au niveau de l'émetteur qui sont relativement simples à implémenter et ne requièrent pas d'échange avec le récepteur. Ainsi, en combinant DL-IC à LP-ABS, on vise à garder la même performance que DL-IC seule ou même la dépasser tout en réduisant le nombre de contraintes d'annulation donc la complexité de DL-IC. Par la suite, la charge de calcul est désormais distribuée entre l'émetteur et le récepteur. La perte en performance qui résulte de la réduction du nombre de contraintes d'annulation de DL-IC sera alors compensée par la technique LP-ABS.

Dans cette nouvelle variante de DL-IC et LP-ABS, qu'on appelle MUCICA pour *Mitigation through* Uncoordinated Interference Cancellation and Avoidance, aucune information supplémentaire n'est échangée vue que chaque technique opère indépendemment de l'autre selon le schéma dans le tableau 5.2. Du côté de l'émetteur et durant les sous-trames LP-ABS, la puissance est dynamiquement adaptée en fonction de l'état du canal vu dans le TTI précédent. À la réception, DL-IC est chargée d'annuler l'interférence résiduelle après la technique d'évitement d'interférence.

Tableau 5.2 – Fonctionnement de la combinaison de DL-IC et LP-ABS.

si TTI=0
L'émetteur: puissance = $eNodeB_{power}^{tx}$
Le récepteur exécute DL-IC puis envoie un feedback $(TTI = 0)$
sinon
si la sous-trame est non LP - ABS
L'émetteur: puissance = $eNodeB_{power}^{tx}$
Le récepteur exécute DL-IC puis envoie un feedback ($TTI \neq 0$)
sinon
L'émetteur exécute LP-ABS (feedback(TTI-1)), la puissance est alors calculée
selon l'expression Eq. 5.14
Le récepteur exécute DL-IC puis envoie un feedback $(TTI \neq 0)$
fin
fin

5.3 Évaluation des techniques proposées

Dans cette section, on présente une étude de la performance de nos deux stratégies proposées dans le cadre de la réduction de l'interférence perçue dans un HetNet afin d'améliorer la capacité totale offerte. Dans notre travail, on évalue tout d'abord la DL-IC pour montrer son comportement selon les paramètres à calibrer. Ensuite, on présente une étude de LP-ABS. Pour ce faire, on a adopté une étude comparative où on étudie la performance de nos propositions par rapport à des stratégies existantes. Enfin, on combine les deux techniques et on compare leur performance lorsqu'elles sont implémentées conjointement au cas où elles sont utilisées séparemment.

5.3.1 Approche comparative d'évaluation

Dans cette section, on présente les stratégies conventionnelles existantes pour réduire l'impact de l'interférence dans les HetNets et qui serviront de techniques *benchmark* ou comparatives afin de bien situer la performance de nos deux stratégies DL-IC et LP-ABS. Ces techniques repères ou *benchmark* sont: la FFR ou Fractional Frequency Reuse, le contrôle de puissance sur le lien descendant DL-IC, la technique d'évitement d'interférence avec une puissance nulle ZP-ABS et une technique d'allocation de ressource, ASA [80].

5.3.1.1 FFR

Pour réduire l'interférence avec ses cellules voisines, la station de base utilise la technique de réutilisation des fréquences. Pour pouvoir utiliser la même bande de fréquence dans toutes les cellules, il faut respecter certaines conditions afin de minimiser l'interférence. Parmi les techniques d'ordonnancement des ressources, la réutilisation de fréquences fractionnaire (FFR) a été couremment utilisée. Dans les systèmes OFDMA, la FFR réduit l'interférence [81] en divisant les ressources fréquentielles en sous-bandes qui sont réutilisées avec un facteur de réutilisation. Dans notre techniques FFR *benchmark*, il s'agit de diviser la bande de fréquences en deux : la première sous-bande est dédiée aux usagers du bord de la cellule utilisée avec un facteur de réutilisation 1 ce qui signifie qu'elle est entièrement réutilisée dans les cellules voisines. La deuxième sous-bande est allouée aux usagers se trouvant au centre de la cellule avec un facteur de réutilisation de 3. Le schéma c) dans la figure 5.1 illustre la stratégie FFR qu'on utilise comme stratégie repère.

5.3.1.2 DL-PC

Une autre technique de contrôle d'interférence a été proposée dans 3GPP [82] est le contrôle dynamique de puissance au niveau des cellules femto qu'on note DL-PC pour *Downlink Power Control.* Cette stratégie vise à réduire l'interférence dans le lien descendant dans un HetNet en ajustant dynamiquement la puissance de transmission des cellules femto à un niveau compris entre la puissance de transmission minimale P_{min} et la puissance de transmission maximale P_{max} . Le principe de base du contrôle de puissance dynamique dans la standardisation 3GPP est donné par l'équation suivante [82]:

$$P_{DL} = \max\left(P_{min}, \min\left(P_{max}, P_0 + P_{offset}\right)\right) \tag{5.15}$$

où P_{DL} représente la puissance de transmission de la cellule femto, P_0 est l'interférence reçue mesurée par l'usager femto attaché à la cellule considérée et P_{offset} est définie en fonction du pathloss entre cette cellule femto et l'usager qui lui est attaché. Les valeurs des deux puissances P_{min} et P_{max} sont fixées à -10 dBm et 20 dBm, respectivement

5.3.1.3 ZP-ABS

ZP-ABS pour Zero-Power ABS est une technique de contrôle de ressources dans le domaine temporel afin de minimiser l'effet de l'interférence. Comme décrit dans la sous-section 5.2.2, le ZP-ABS suppose que la station de base agresseur ne transmet pas de données ou autrement avec une puissance nulle. Cependant, la station de base en question suspend sa transmission durant des intervalles de temps spécifiques correspondant aux sous-trames ZP-ABS. Ces dernières sont définies par un modèle périodique caractérisé une période et un taux qui représente le nombre de sous-trames où on annule la puissance par rapport à la période précisée.

5.3.1.4 ASA

La technique ASA pour *Adaptive Subband Allocation* a été proposée dans [80] pour servir de repère pour notre stratégie d'annulation d'interférence DL-IC. Dans ASA, les stations macro utilisent tout le spectre disponible alors que les cellules femto utilise uniquement une fraction du spectre. Les usagers macro sont classifiés en des usagers victimes ou sans danger selon l'interférence qu'il reçoivent des cellules femto sur le lien descendant. Pour chaque station macro, on considère l'ensemble des cellules femto y hébergeant et ses K usagers macro victimes. Pour chaque usager victime k, on attribue aux blocs de ressources lui servant, RBs r = 1, ..., N, un classement $R_{r,k}$ de 1 à Ntraduisant les SINRs et les classant dans un ordre décroissant. Pour chaque RB r, on calcule une moyenne, s_r , de tous les classements pour les différents usagers victimes servis par la même cellule macro où $s_r = mean\{..., R_{k,r}, ...\}, k \in \{1, ..., K\}.$

Ensuite, on classe les blocs de ressources selon les moyennes obtenues (i.e., $s_{r_m} < s_{r_{m+1}}$ avec r_m réfère au RB ordonné).

Comme dans [83], on définit une zone libre des cellules femto, *femto free-zone*, correspondant aux RBs où elles sont interdites de transmettre. La station femto détermine sa zone libre caractérisée par le nombre B de RBs parmi les N RBs disponibles à interdire selon le taux ρ_B défini comme suit:

$$B = \lceil N \times \rho_B \rceil \tag{5.16}$$

où

$$\rho_B = \frac{K}{N_F + N_M},\tag{5.17}$$

 N_F et N_M constituent le nombre d'usagers femto et macro servis par la station femto agresseur et sa station macro servante, respectivement. Les *B* RBs ayant les plus faibles scores s_r et correspondant aux moyennes r_1 à r_B sont finalement bloqués. Enfin, les ressources blocs permises pour la station femto sont ordonnancés selon le *proportional fair scheduler* pour servir les usagers femto qui lui sont attachés.

5.3.2 Analyses et discussion

Après avoir décrit nos deux stratégies de réduction de l'interférence, LP-ABS et DL-IC, ainsi que les stratégies *Benchmark*, on étudie ici leurs performances quand elles sont utilisées sépéremment, dans un premier lieu, et conjointement dans un second lieu. La performance de notre système est traduite en fonction du débit total réalisé en appliquant les stratégies citées plus haut. Pour ce faire, on considère le même simulateur qui a été présenté dans le chapitre 3 pour évaluer les technologies LTE et qui a été amélioré par la suite pour l'étude des réseaux HetNets comme dans le chapitre 4.

Paramètre	Cellule macro	Cellule femto
Temps de simulation	100 TTIs * 80 itérations	
Paramètres de DL-IC	$\alpha_m = 4.5\beta_m, \beta_m = 10^-3$	$\beta_f = 10^4 \ [76]$
	$Au = 1, \text{ et } Al = 10^{-2}$	
Paramètres de LP-ABS	$M_G = 10$ sous-trames	
	$M_f=20\%$	
	$[P1 \ P2 \ P3] = [6 \ 3 \ 0] \ (dB)$	

Tableau 5.3 – Paramètres des simulations pour les stratégies de mitigation de l'interférence.

Les paramètres des simulations de cette partie sont définis dans le tableau 5.3 en plus des paramètres déjà présentés dans le tableau 3.2.

5.3.2.1 Évaluation de la stratégie DL-IC seule

Comme on l'a mentionné dans la description de la stratégie DL-IC, cette stratégie dépend de certains paramètres: β_m , β_f , α_m , A_u et A_l . Ces paramètres ont été calibrés dans [77] pour garder les valeurs qui assurent un compromis entre la complexité et la performance d'un côté et la réalisabilité d'un autre côté. En effet, on a simulé pour différentes valeurs de ces paramètres afin de garder la meilleure combinaison pour la suite. On a montré que pour des valeurs de β_m appartenant à $[10^{-4} \ 10^{-3} \ 10^{-2} \ 10^{-1} \]$, plus β_m est faible plus le gain en débit est élevé. Cependant, pour des valeurs inférieures à 10^{-3} , le gain en débit se stabilise au dessous de $\beta_m = 10^{-4}$. De plus, avec $\beta_m = 10^{-3}$, on réalise un gain de 200% plus 98% pour chaque cellule femto ajoutée par rapport à un réseau homogène [75]. Ainsi, on prend $\beta_m = 10^{-3}$ dans toute la suite. Quant à α_m et β_f , elles sont fixées à $\alpha_m = 4.5\beta_m$ et 10^4 [76], respectivement. Pour α_m , le choix répondait à la condition tirée de l'équation 5.10. On doit d'abord vérifier que $\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1 \ge 0$, ce qui est assuré par $\alpha_m > 4\beta_m$. Le paramètre α_m doit tout de même être minimisé le plus possible afin de maximiser le terme $\hat{\gamma}_{u,r}$. Pour ce faire, on a simulé pour différentes valeurs de α_m , i.e., $\alpha_m = 4.1\beta_m, 4.2\beta_m, \ldots 4.5\beta_m$, etc. On a noté une saturation de la performance au delà de $\alpha_m = 4.5\beta_m$ c'est pourquoi on choisit $\alpha_m = 4.5\beta_m$ [75].

Pour les bornes inférieure et supérieure, la même approche que pour β_m a été employée pour les choisir en assurant le meilleur gain en débit mais aussi en respectant la faisabilité de la technique. De son côté, la borne supérieure traduit le nombre de signaux à annuler; plus elle est proche de 1, plus on annule de signaux ce qui augmente sa complexité, par contre plus elle s'approche de 0 moins on annule de signaux ce qui réduit la performance du système. Ainsi, un choix judicieux de A_u permet de gagner en performance et en complexité. Quant à la borne inférieure, elle traduit l'aspect réaliste d'une annulation d'interférence qui ne pourrait pas être parfaite avec des coefficients égaux à 0, équivalent à une annulation totale des signaux interférants. Pour cette raison, il faut choisir convenablement ce paramètre afin de s'approcher le plus de la réalité.

Dans les figures 5.4 et 5.5, on varie la borne inférieure en fixant la valeur de A_u . Les résultats montrent que plus la borne inférieure est petite, relativement, plus la performance en débit est améliorée. Cette observation vient appuyer l'imposition d'une limite inférieure. En effet, plus la borne inférieure est petite, plus on annule de signaux avec des coefficients supérieurs.

Dans les figures 5.6 et 5.7, on présente les résultats en termes de débit total et de gain en débit par rapport à un réseau homogène, respectivement, en fixant la borne inférieure à 10^{-2} et en variant la borne supérieure. On remarque que plus on augmente la borne supérieure, plus les débits sont élevés puisque cette marge permet d'annuler plus de signaux interférants avec des coefficients inférieurs à A_u .



Figure 5.4 – Performance de DL-IC en fonction de la borne inférieure A_l pour $A_u = 10^{-2}$.



Figure 5.5 – Gain en débit de DL-IC par rapport à un réseau homogène en fonction de la borne inférieure A_l avec $A_u = 10^{-2}$.



Figure 5.6 – Performance de DL-IC en fonction de la borne supérieure A_u avec $A_l = 10^{-2}$.



Figure 5.7 – Gain en débit de DL-IC par rapport à un réseau homogène en fonction de la borne supérieure A_u avec $A_l = 10^{-2}$.

Pour optimiser la stratégie DL-IC, on considère une autre dimension à savoir le nombre de signaux à annuler ou le nombre de contraintes d'annulation afin d'étudier la performance de notre système en termes de débit et de complexité. Pour ce-ci, on ne considère plus la borne supérieure puisqu'on va choisir le nombre de signaux à annuler noté N_c . En effet, préciser le nombre de contraintes d'annulation permet de réduire la complexité de la stratégie DL-IC par rapport au cas où le nombre d'interférants à annuler est défini par la borne supérieure. Le récepteur est tenu alors à annuler les N_c signaux interférants correspondants aux N_c coefficients d'annulation les plus faibles calculés dans la sous-section 5.2.1. On fixe A_l à 10^{-2} tout en faisant varier le nombre de contraintes d'annulation pour enfin obtenir les résultats illustrés par les figures 5.8 et 5.9. Les résultats obtenus montrent que DL-IC est d'autant plus performant en augmentant la valeur de N_c . On note que plus le réseau est dense en cellules femto par cellule macro, plus DL-IC est efficace en augmentant N_c . En effet, on observe que le gain apporté pour 25 cellules femto par cellule macro est plus important que celui apporté pour une densité en cellules femto par cellule macro plus faible. La performance tend à se saturer au delà de $N_c = 4$.



Figure 5.8 – Performance de DL-IC en fonction de N_c pour différents nombre de cellules femto par cellule macro.



Figure 5.9 – Performance de DL-IC et des des stratégies Benchmark en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro pour différents N_c .

Dans la suite de notre travail, on fixe $A_l \ge 10^{-2}$ et $A_u \ge 1$ et on fait varier le nombre de contraintes d'annulation N_c .

Dans les figures 5.10 et 5.11, on présente la performance de DL-IC par rapport aux stratégies *benchmark* décrites plus haut. On confirme bien que DL-IC dépasse ces stratégies en performance.



Figure 5.10 – Performance de DL-IC par rapport aux stratégies *benchmark* en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro.



Figure 5.11 – Gain en débit de DL-IC et des stratégies *benchmark* en fonction du nombre de cellules femto par cellule par rapport à un réeau homogène.

5.3.2.2 Évaluation de la stratégie LP-ABS seule

Dans cette partie, on évalue la performance de LP-ABS en suivant l'approche comparative avec les stratégies *benchmark* décrites plus haut. Dans les figures 5.12 et 5.13, on trace les courbes de débit total et du gain en débit, respectivement, en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro. Ces résultats montrent que LP-ABS dépasse les techniques *benchmark* en performance. De plus, on prouve que réduire la puissance de la station de base dynamiquement donne de meilleurs résultats que ceux obtenus dans le cas où on annule la puissance de transmission. De plus LP-ABS dépasse la technique d'évitement utilisant le contrôle de puissance.



Figure 5.12 – Performance de LP-ABS par rapport aux stratégies *benchmark* en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro.



Figure 5.13 – Gain en débit de LP-ABS et des stratégies Benchmark en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro par rapport à un réseau homogène.

5.3.2.3 Évaluation des stratégies DL-IC et LP-ABS combinées: MUCICA

LP-ABS est une technique prometteuse et une bonne candidate pour réduire la complexité de DL-IC lorsqu'elles sont combinées. Pour cette raison, on compare leur performance séparément afin d'étudier le comportement de LP-ABS vis à vis de la complexité de DL-IC. On tarduit les résultats en termes de débit total dans la figure 5.14 où on compare DL-IC (pour différentes valeurs de N_c) avec LP-ABS. Pour les nombres de cellules femto par cellule macro de 5 à 20, LP-ABS dépasse DL-IC en performance avec $N_c = 1$ et l'égalise pour 5 et 10 cellules femto par cellule macro avec $N_c = 2$. Au delà de $N_c = 2$, DL-IC l'emporte sur LP-ABS. Pour 25 cellules femto par cellule macro, LP-ABS n'a aucun effet vue notre hypothèse qui suggère que les 25 usagers sont tous attachés à une cellule femto.



Figure 5.14 – Performance de LP-ABS comparée à DL-IC en fonction du nombre de contraintes d'annulation.

Ainsi, LP-ABS permettra de réduire la complexité de DL-IC en opérant à de basses valeurs de N_c . En effet, la perte en débit qui en résulte sera compensée par LP-ABS pour garder la même performance que DL-IC à des N_cs plus élevées ou même l'excéder.

Les conclusions tirées de la figure 5.14 sont appuyées par la figure 5.15 où on présente le comportement de LP-ABS par rapport à DL-IC en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro. Sur cette figure, on voit clairement que LP-ABS dépasse DL-IC avec $N_c = 1$ et l'égalise en performance pour 5 et 10 cellules femto avec $N_c = 2$.

Ayant collecté ces données, MUCICA répond bel et bien à notre objectif. En simulant notre système avec les stratégies combinées, on obtient les résultats dans la figure 5.16.



Figure 5.15 – Performance de LP-ABS comparée à DL-IC en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro.



Figure 5.16 – Performance de la combinai
son DL-IC et LP-ABS en fonction du nombre de contraintes d'annulation.



Figure 5.17 – Performance de la combinaison DL-IC et LP-ABS en fonction du nombre de cellules femto par cellule macro.

On observe bien que la combinaison de DL-IC et LP-ABS donne de meilleurs résultats par rapport à DL-IC seule. On obtient, pour 5 cellules femto par cellule macro, un gain en débit de 42.3% et de 12.35% avec $N_c = 1$ et $N_C = 6$, respectivement, par rapport à DL-IC seul. On note que le gain en performance est inversement proportionnel au nombre de contraintes d'annulation. En effet, en augmentant N_c , DL-IC arrive à annuler plus de signaux interférants.

Selon nos résultats, on observe sur les figures 5.16 et 5.17 que:

- MUCICA $(N_f = 5, N_c = 1) = DL IC(N_f = 5, N_c = 2),$
- MUCICA $(N_f = 5, N_c = 2) = DL IC(N_f = 5, N_c = 4),$
- MUCICA $(N_f = 5, N_c = 3) = DL IC(N_f = 5, N_c = 6).$
- MUCICA $(N_f = 10, N_c = 1) = DL IC(N_f = 10, N_c = 2),$
- MUCICA $(N_f = 10, N_c = 2) = DL IC(N_f = 10, N_c = 4),$
- MUCICA $(N_f = 10, N_c = 3) > DL IC(N_f = 10, N_c = 6).$

On remarque que MUCICA assure la même performance que DL-IC avec la moitié du nombre de contraintes N_c (pour de faibles valeurs de N_c) ou même la dépasse (pour des valeurs élevées de N_c). La complexité est alors réduite d'au moins 50 %. En effet si la complexité de DL-IC est de l'ordre de
$O(N_c)$, le gain en complexité de MUCICA par rapport à DL-IC est alors de 1-(1/2) = 1/2, *i.e.*, 50% ou plus.

D'après les courbes (voir figure 5.18), en fonctionnant avec un nombre de contraintes d'annulation $N_c = 3$, notre système peut donner une meilleure performance dépassant celle obtenue par DL-IC avec $N_c = 6$.

Finalement, MUCICA a bien satisfait notre objectif de réduire la complexité de la stratégie DL-IC au niveau du récepteur sans perdre en performance mais l'améliorer.



Figure 5.18 – Performance de la combinaison DL-IC et LP-ABS pour $N_c = 3$ par rapport à DL-IC seule pour différents N_c .

Le tableau 5.4 résume le compromis assuré par la combinaison des deux techniques en termes de gains en complexité et en débit. On présente ces gains pour différents nombre de cellules femto par cellule macro en fonction de la complexité de DL-IC, $O(N_c)$, qui dépend de N_c . À partir du tableau, on remarque qu'on peut opter soit pour un gain important en complexité avec un faible gain ou une légère perte en débit, soit pour un faible gain en complexité avec un gain en débit assez important. \mathcal{T} désigne le débit obtenu pour chaque N_c .

	DL-IC		MUCICA		Cain an Dábit	Gain en complexité		
	N_c	\mathcal{T} [Mbps]	N_c	\mathcal{T} [Mbps]	Gam en Debit	$O(N_c)$	$O(N_c^2)$	$O(N_c^{3})$
r								
5 femtos	6	1861	3	1926	3.49~%	50.00~%	75.00~%	87.50~%
			2	1781	-4.29 %	66.66~%	88.88~%	96.29~%
	5	1798	3	1926	7.12~%	40.00~%	64.00~%	78.40~%
			2	1781	-0.94 %	60.00~%	84.00 %	93.60~%
	6	2881	3	3027	5.06~%	50.00~%	75.00~%	87.50~%
10 formton			2	2813	-2.36 %	66.66~%	88.88 %	96.29~%
10 lenitos	5	2845	3	3027	6.39~%	40.00 %	64.00~%	78.40~%
			2	2813	-1.12 %	60.00~%	84.00 %	93.60~%
	6	3890	4	4157	6.86~%	33.33~%	55.55~%	70.37~%
15 formton			2	3768	-3.13 %	66.66~%	88.88~%	96.3~%
15 lenitos	5	3837	3	3990	3.98~%	40 %	64 %	78.4~%
			2	3768	-1.8 %	60 %	84 %	93.6~%
20 formt og	6	4828	4	5025	4.08~%	33.33~%	55.55~%	70.37~%
			3	4827	-0.02 %	50.00~%	75.00~%	87.50~%
20 ienitos	5	5 4792	3	4827	0.73~%	40.00~%	64.00~%	78.40~%
			2	4476	-6.59~%	60.00~%	84.00 %	93.60~%

Tableau 5.4 – Le compromis entre le gain en complexité et le gain en débit réalisé par MUCICA par rapport à DL-IC en fonction du nombre de cellule femto par cellule macro.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié la gestion de l'interférence dans les réseaux HetNets. On a considéré deux catégories: l'évitement d'interférence, un processus exécuté au niveau de l'émetteur, et l'annulation d'interférence, un processus assuré par le récepteur. On a proposé une nouvelle stratégie dans chaque catégories: LP-ABS et DL-IC. Les deux techniques ont apporté une amélioration de la performance du système en termes de débit total. Cependant, DL-IC donne de meilleurs résultats avec une complexité accrue au niveau du récepteur. Pour alléger cette charge, on a suggéré de combiner DL-IC avec LP-ABS afin de réduire la complexité de DL-IC d'une part et réaliser la même performance ou mieux encore, l'améliorer.

En simulant la combinaison DL-IC et LP-ABS, on a pu obtenir une meilleure performance avec des contraintes d'annulation faibles, d'où une complexité réduite, par rapport au cas où DL-IC fonctionne seul. Pour un nombre de contraintes d'annulation $N_c = 3$, la combinaison DL-IC/LP-ABS surpasse la performance de DL-IC avec $N_c \geq 3$.

Conclusion générale

Tout au long de cette thèse, on a considéré la technologie LTE depuis ses débuts. On a d'abord travaillé sur son évaluation au sein du CEG afin de valider l'interface radio candidate pour satisfaire les exigences de l'UIT. On a montré que l'interface radio de 3GPP/LTE était conforme aux normes de l'UIT; elle dépassait même les performances souhaitées. LTE de 3GPP a été retenue et standardisée.

On a ensuite considéré les réseaux HetNets dans LTE qui constituent une solution aux limites de la capacité face à la demande croissante en débit des nouvelles application d'une part et à l'apparition de nouveaux équipements intelligents. Dans notre cas, les HetNets sont formés de deux couches de cellules où les cellules macro peuplées par des cellules femto. Le déploiement des cellules femto a pour objectif de servir les usagers se trouvant dans des trous de couverture dans les environnements intérieurs comme les centres commerciaux, les hôpitaux, les stations de métro, etc. On a montré dans notre travail que les HetNets réalisent des gains importants en débit par rapport aux réseaux homogènes à une seule couche de cellules macro.

Dans un contexte réel, les stations femto sont installées par des particuliers d'une façon ad-hoc d'où on ne connait ni leur nombre ni leur positions à l'avance. Cet aspect aléatoire nous impose des scénarios d'interférence imprévisibles. Ainsi, l'insertion des cellules femto introduit plus d'interférence sur le lien descendant ce qui affecte la qualité offerte par les HetNets. Plusieurs techniques de réduction de l'interférence ont été proposées.

Dans notre travail, on a considéré, en premier lieu, une stratégie d'annulation, DL-IC, et une stratégie d'évitement, LP-ABS, de l'interférence. Ces deux stratégies ont permis d'améliorer la capacité des HetNets en termes de débit total. En second lieu, on a travaillé sur l'optimisation de notre approche en combinant les deux stratégies afin de réduire la complexité de DL-IC qui a montré une grande robustesse. La stratégie résultante a permis d'améliorer les gains en débits par rapport au cas où seul DL-IC est appliqué en réduisant sa complexité.

Références

- Z. Bharucha, A. Saul, G. Auer, and H. Haas, "Dynamic Resource Partitioning for Downlink Femto-to-Macro-Cell Interference Avoidance", *EURASIP Journal on Wireless Communications* and Networking, mai 2010.
- [2] ITU Telecommunications, The World in 2013: ICT Facts and Figures. http://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Documents/facts/ICTFactsFigures2013-e. pdf
- [3] Samuel Pierre, "Réseaux et systèmes informatiques mobiles: Fondements, architectures et applications", Presses Internationales Polytechniques, 2003, isbn: 978-2-553-01038-5.
- [4] Harri Holma, Antti Toskala, "WCDMA FOR UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications", Nokia, Finland, John Wiley & Sons Ltd, 2004, isbn: 0-470-87096-6.
- [5] NTT DoCoMo, et al., "Proposed Study Item on Evolved UTRA and UTRAN", TSG-RAN Meeting #26, RP-040461, Athène, Grèce, 8-10 décembre, 2004.
- [6] http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=rwp5d&lang=en
- [7] ITU-R : IMT-Advanced Requirements, mars 2007.
- [8] 3GPP: TR 36.913 V10.0.0 Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced) (Release 100, Techn. Ber., mars 2011.
- [9] 3GPP : TS 36.300 V8.12.0 Technical Specification Group Radio Access Network, Techn. Ber., mars 2010.
- [10] 3GPP : TS 36.401 V8.8.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Architecture description (Release 8), Techn. Ber., juin 2010.
- [11] 3GPP : TS 23.401 V8.16.0 General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access (Release 80, Techn. Ber., mars 2012.
- [12] 3GPP : TS 36.211 V9.1.0 Technical Specification Group Radio Access Network; Physical Channels and Modulation, Release 9, Techn. Ber., mars 2010.
- [13] 3GPP : TS 36.321 Technical Specification Group Radio Access Network; Medium Access Control (MAC) protocol specification, Release 9.
- [14] 3GPP : TS 25.814 Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspect for evolved universal terrestrial radio access (utra), Release 7.
- [15] 3GPP : TS 36.302 Technical Specification Group Radio Access Network; Services provided by the physical layer Release 8, décembre 2007.
- [16] 3GPP : TS 24.301 Technical Specification Group Radio Access Network; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3 (Release 8).

- [17] 3GPP : TS 36.201 Technical Specification Group Radio Access Network; LTE physical layer; General description, Release 10, décembre 2010.
- [18] 3GPP : TR 36.912 V10.0.0 Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTEAdvanced) (Release 10), Techn. Ber., mars 2011.
- [19] K. Fazel and S. Kaiser, "Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems", 2003, John Wiley & Sons Ltd, isbn 0-470-84899-5.
- [20] Johan Sköld Erik Dahlman, Stefan Parkvall und Per Beming : "3G Evolution : HSPA and LTE for Mobile Broadband", 2008.
- [21] Adaptive Radio Resource Management for VoIP and Data Traffic in 3GPP LTE Networks – M.E.O. Lierida - M.Sc. Thesis, mars 2008 – KTH.
- [22] Moray Rumney BSc, C. Eng, MIET, "3GPP LTE: Introducing Single-Carrier FDMA", Agilent Technologies, 2008. http://www.agilent.com/go/journal
- [23] D. Astely, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Lindstrom, and S. Parkvall, "Lte: the evolution of mobile broadband", *IEEE Commun. Magazine*, Vol. 47(4), pages 44–51, avril 2009.
- [24] IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD).
- [25] Report ITU-R M.2135: Requirements, evaluation criteria, and submission.
- [26] Report ITU-R M.2135: Requirements, evaluation criteria, and submission.
- [27] 3GPP TR 36.213: Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for further advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced).
- [28] 3GPP TR 36.212: Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)
- [29] IEEE P802.16m/D4.
- [30] R. Nasri, E. Rakotomanana, S. Affes, and A. Stéphenne, "On the Evaluation of the LTE-Advanced Proposal within the Canadian Evaluation Group (CEG) Initiative: Preliminary Work Results", Proc. of 25th Biennial Symposium on Communications, Queen's University, Kingston, ON, Canada, 12-14 mai 2010.
- [31] Cisco, "Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2010–2015", 2011.
- [32] R. Qingyang Hu and Y. Qian, "Heterogeneous Cellular Networks", John Wiley & Sons, juin 2013.
- [33] A. Damnjanovic, J. Montojo, Yongbin Wei, Tingfang Ji, Tao Luo, M. Vajapeyam, Taesang Yoo, Osok Song, D. Malladi, "A SURVEY ON 3GPP HETEROGENEOUS, Wireless Communications", vol. 18, no. 3, juin 2011.
- [34] V. Chandrasekhar, J.G. Andrews, "Femtocell Networks: A Survey", IEEE Communications Magazine 2008; 46(9): 59-67.
- [35] E. Seidel, E. Saad, "LTE Home Node Bs and its enhancements in Release 9", Nomor Research GmbH, Munich, Germany, mai 2010.
- [36] J.Chen, P. Rauber, D. Singh, C. Sundarraman, P. Tinnakornsrisuphap, M. Yavuz, "Femtocells-Architecture & Network Aspects", Qualcomm, janvier 2010.
- [37] J. Kim, H. Kim, K. Cho, N. Park," SON and Femtocell Technology for LTE-Advanced System", 6th International Conference on Wireless and Mobile Communications, S. 286–290, septembre 2010.

- [38] D. N. Knisely, Airvana, Inc., T. Yoshizawa, Thomson Telecom, F. Favichia, Alcatel-Lucent, "FEMTOCELL WIRELESS COMMUNICATIONS: Standardization of Femtocells in 3GPP", IEEE Communications Magazine, septembre 2009.
- [39] 3GPP Technical Specification 22.220 v.1.0.1: "Service Requirements for Home NodeBs and Home eNodeBs", Release 9, décembre 2008, www.3gpp.org.
- [40] Mauro Fiacc, "Using NTP for network synchronisation femtocells of of 3G femtocells", octobre 2008.
- [41] IEEE 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD), IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, janvier 2009.
- [42] M. Wrulich, S. Eder, I. Viering and M. Rupp, "Efficient Link-to-System Level Model for MIMO HSDPA", 2008.
- [43] K. Brueninghaus, D. Astely, T. Salzer, S. Visuri, A. Alexiou, S. Karger, and G.-A. Seraji, "Link performance models for system level simulations of broadband radio access system", pp. 2306-2311, Vol. 4, 2005.
- [44] Xin He and Kai Niu and Zhiqiang He and Jiaru Lin, "Link Layer Abstraction in MIMO-OFDM System" (2007), 41 -44.
- [45] R. Sandanalakshmi, T.G. Palanivelu, and K. Manivannan, "Effective SNR mapping for link error prediction in OFDM based systems", pp. 684-687, 2007.
- [46] E. Tuomaala and Haiming Wang, "Effective SINR approach of link to system mapping in OFDM/multi-carrier mobile network", IEEE Conference Publications, pp. 140-140, 2005.
- [47] WINNER, "IST-2003-507581 D2.7 ver 1.1 Assessment of Advanced Beamforming and MIMO Technologies", 2005.
- [48] T. Zahir, K. Arshad, A. Nakata and K. Moessner, "Interference Management in Femtocells", IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol.15, No. 1, pp. 293-311, 2013.
- [49] S. Kaimaletu, R. Krishnan, S. Kalyani, N. Akhtar and B. Ramamurthi, "Cognitive Interference Management in Heterogeneous Femto-Macro Cell Networks", IEEE International Conference on Communications, pp. 1-6, 2011.
- [50] S. Rangan, "Femto-Macro Cellular Interference Control with Subband Scheduling and Interference cancellation", IEEE Global Communications Conference, pp. 695-700, 2010.
- [51] Huawei, Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE, Huawei, mai 2005.
- [52] Huawei, "Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE", 3GPP R1-050507, mai 2005.
- [53] 3GPP, "TR 36.213 v10.3.0, E-UTRA; Physical layer procedures (Release 10)", septembre 2011.
- [54] S. Sen, N. Santhapuri, R.R. Choudhury, and S. Nelakuditi, Successive Interference Cancellation: Carving out MAC Layer Opportunities, IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012.
- [55] V. R. Cadambe, Syed A. Jafar, Interference alignment and spatial degrees of freedom for the k user interference channel, IEEE International Conference on Communications, 2008, pp. 971–975.
- [56] Jörg R., Markus R., Interference Alignment in UMTS Long Term Evolution, 19th European Signal Processing Conference, Barcelona, Spain, 2011.
- [57] Danish A., Mustansir M., Andreas W., Multi User Inter Cell Interference Alignment in Heterogeneous Cellular Networks, Vehicular Technology Conference Spring, Seoul, Korea, 2014.
- [58] W. Shin, W. Noh, K. Jang, H.-H. Choi, *Hierarchical interference alignment for downlink he*terogeneous networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, vol. 11, no. 12, pp. 4549–4559.

- [59] K. Gomadam, V.R. Cadambe, and S.A. Jafar, Approaching the capacity of wireless networks through distributed interference alignment, IEEE Global Telecommunications Conference, 2008, pp. 1-6.
- [60] N.Saquib, E. Hossain, B.L. Long, I.K. Dong, Interference Management in OFDMA Femtocell Networks: Issues and Approaches. IEEE Transactions on Wireless Communications 2012, juin, Vol. 19, Issue 3, pp. 86-95.
- [61] A. Damnjanovic, J. Montojo, W. Yongbin, J. Tingfang, L. Tao, M. Vajapeyam, Y. Taesang, S. Osok, D. Malladi, A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks. IEEE Wireless Communications 2011, juin, Vol. 18, Issue 3, pp. 10-21.
- [62] 4GPP, R1-104256, eICIC Solutions Details, Juillet 2010
- [63] 4GPP, R1-104661, Comparison of Time-Domain eICIC Solutions, Août 2010.
- [64] M.I. Kamel, K. M. F. Elsayed, Performance Evaluation of a Coordinated Time-Domain eICIC Framework based on ABSF in Heterogeneous LTE-Advanced Networks, IEEE Global Communications Conference, décembre 2012.
- [65] I. Guvenc, G. de la Roche, M. Kountouris, T.Q.S. Quek, and J. Zhang D. Lopez-Pérez, Enhanced Inter-Cell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks, IEEE Wireless Communications Magazine, pp. 1218-1230, juin 2011.
- [66] Liqi Gao, Hui Tian, Peng Tian, Jun Zhang and Meng Wang, A distributed dynamic ABS ratio setting scheme for macro-femto heterogeneous networks, IEEE International Conference on Communications Workshops, pp. 1221-1225, juin 2013.
- [67] 3GPP, Technical specification group radio access network, Way forward on time-domain extension of Rel 8/9 backhaul-based ICIC, R1-105779, octobre 2010.
- [68] A. Khandekar, N. Bhushan, T. Ji and V. Vanghi, *LTE_Advanced: Heterogeneous Networks*, IEEE European Wireless Conference, avril 2010.
- [69] B. Soret and Klaus I. Pedersen, Macro Transmission Power Reduction for HetNet Co-Channel Deployments, IEEE Global Communications Conference, pp. 4126-4130, décembre 2012.
- [70] 3GPP R1-120768, Discussion on the features and signaling support for non-zero transmit power ABS, Fujitsu, 3GPP RAN1#68, février 2012.
- [71] 3GPP R1-120223, Potential Issues regarding Low Power ABS, Panasonic, 3GPP RAN1#68, février 2012.
- [72] 3GPP R1-120223, Reduced transmission power ABS concept considerations, Nokia Siemens Networks, Nokia, 3GPP RAN1#68, février 2012.
- [73] 3GPP R1-113635, Performance evaluation of FeICIC with zero and reduced power ABS, Huawei, HiSilicon, 3GPP RAN1#68, février 2012.
- [74] S. Ahmadi, LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies, Academic Press, 2013.
- [75] A. Latrach, R. Nasri and S. Affes, Downlink interference cancellation strategy for sharedspectrum LTE HetNet, 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2013, pp. 1809-1815.
- [76] Duy T.N., Long B.L., Le-Ngoc T., Hossain E., Dong I.K., Distributed Interference Management in Two-Tier CDMA Femtocell Networks, IEEE Transactions on Wireless Communications 2012, mars, Volume 11, Issue 3, pp. 979-989.

- [77] A. Latrach, Stratégies d'Annulation d'Interférence sur le Lien Descendant d'un Réseau Sans Fil LTE Hétérogène, M.Sc. Thesis, INRS, Décembre 2012. http://www.wirelesslab.ca/fr_ 1025_index.php
- [78] M. Andersin, Z. Rosberg, et J. Zander, Gradual removals in cellular PCS with constrained power control and noise, Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, volume 1, pp. 56-60, septembre 1995.
- [79] R. Haratian, and A.R. Sharafat, Better QoS and less power in wireless ad hoc networks by distributed power control using power and SINR-based pricing functions, International Conference on Wireless Communications Signal Processing, pp. 1-5, novembre 2009.
- [80] R. Nasri, A. Latarch and S. Affes, *Throughput-and Cost-Efficient Interference Cancellation Strategies for the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNets*, octobre 2014.
- [81] J. Kim, Hongsoog Kim, Kyongtak Cho, N. Park, SON and Femtocell Technology for LTE-Advanced System, 6th International Conference on Wireless and Mobile Communications, pp. 286-290, septembre 2010.
- [82] Lin Yang and Pingping Wen, Location Based Autonomous Power Control for ICIC in LTE-A Heterogeneous Networks, IEEE Global Telecommunications Conference, pp. 1-6, décembre 2011.
- [83] Kaimaletu S., Krishnan R., Kalyani S., Akthar N., Ramamurthi B., Cognitive Interference Management In Heterogeneous Femto-Macro Cell networks. IEEE International Conference on Communications, pp. 1-6, août 2011.
- [84] R. Nasri, S. Affes, and A. Stéphenne, "Combined Interference Cancellation and Avoidance Over the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNet", Proc. ICUWB, octobre 2015.

Annexes

Listes des publications

Articles de revues publiés ou soumis:

R. Nasri, A. Latarch and S. Affes, *Throughput-and Cost-Efficient Interference Cancellation Strategies for the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNets*, DOI: 10.1002/wcm.2515, October 2014.

RESEARCH ARTICLE

Throughput and Cost-Efficient Interference Cancellation Strategies for the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNet

Raouia Nasri, Ahmed Latrach, and Sofiène Affes*

INRS-EMT, 800, de la Gauchetière W., Suite 6900, Montreal, QC, H5A 1K6, Canada E-mails: {nasri, latrach, affes}@emt.inrs.ca

ABSTRACT

In a heterogeneous network (HetNet), small cells such as femtocells considered in this work, are deployed jointly with macrocells. This new cells' layer, when added to the network, generates interference which could hamper neighboring macro user equipment (MUE) and femto user equipment (FUE) transmissions. In fact, this interference results in degradation of the network performance. In this paper, we propose a downlink interference cancellation (DL-IC) strategy for spectrum-sharing LTE (Long Term Evolution) HetNet. This DL-IC strategy aims to reduce the interference impact on users by optimizing their received signal to interference plus noise ratio (SINR) using new utility functions for both FUEs and MUEs. These utility functions allow relaxation of the cancellation ratios in order to reduce implementation complexity while maximizing SINR, QoS and throughput. We support by different system-level simulations that both global network performance and user experience in terms of total throughput and received SNR or link-level throughput, respectively, are significantly enhanced. Throughput gains achievable by the new DL-IC strategy can reach as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per additional femtocell base station in a basic spectrum-sharing LTE HetNet without IC. These performance figures are shown to surpass those achieved by interference avoidance techniques using either power or frequency resource allocation. Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Ltd.

KEYWORDS

LTE HetNet, Downlink Interference, Cancellation, Resource Allocation.

* Correspondence

R. Nasri, Institut National de La Recherche Scientifique e-mail: nasri@emt.inrs.ca

1. INTRODUCTION

Mobile communication systems undergo constant growth in terms of number of subscribers. In fact, the ITU organization confirms that by the end of 2011 the number of mobile service subscribers reached six billions around the world, with a penetration factor of 86% [1]. In addition, these users require increasingly better quality of service and a wide coverage characterized by a strong signal, specifically in low-coverage areas. To cope with these challenges, the new concept of a Heterogeneous Network (HetNet) was adopted. In HetNet, the network integrates small coverage cells such as femtocells (considered here for illustration purposes and

 $^{^\}dagger$ Work supported by Discovery Grants Program and a Discovery Accelerator Supplement (DAS) Award of NSERC.

Prepared using wcmauth.cls [Version: 2010/07/01 v2.00]

without loss of generality), picocells, or microcells, in conjunction with the existing macrocells. This new cells' layer has been adopted by many wireless communication systems to increase their capacity, maintain their coverage, and meet the quality of service (QoS) requested by their customers [2]. Among these systems, Long Term Evolution (LTE) developed by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) has envisaged femtocells since release 8, with more complete specifications in LTE release 10 (LTE-Advanced) [3]. However, these new cells generate more interference that hampers some victim users' connectivity. Consequently, intense research efforts are underway to address this crucial problem and thereby allow full exploitation of the potential benefits of HetNet without hindering the network's performance.

Several research works have tackled the issue of DL interference mitigation in LTE HetNet network along different approaches. These are mainly categorized into interference cancellation (typically at the receiver) and interference avoidance (typically at the transmitter) techniques. In the latter category, interference coordination or avoidance was widely presented as an efficient approach that applies restrictions on power, time and/or frequency resource management in a coordinated way between cells.

Several interference coordination techniques for HetNet were discussed in [4] and [5], mainly by splitting available resources between macrocells and femtocells (or small cells in general) in the time-frequency grid. Since bandwidth is shared between macrocells and femtocells, a properly devised splitting policy can overcome the resource sharing challenges [10].

Frequency reuse, for instance, allows an efficient spectrum sharing between base stations, especially for fully loaded deployments where some regions of coverage will experience high interference levels due to the ad-hoc distribution of femtocells. Conventional fractional frequency reuse (FFR) divides the available spectrum into several subbands and assigns them to the cells in such a way that interference is reduced. FFR thereby increases the signal to interference plus noise ratio (SINR), but reduces the achievable throughput over the entire network by preventing exploitation of the full spectrum. To overcome this gap, adaptive FFR was adopted in several works [10] by updating subband allocation in a dynamic way properly adjusted to the interference levels so as to achieve even higher SINRs while allowing much better spectrum usage.

Among interference avoidance techniques, power control algorithms were also widely developed in order to optimize base stations' transmission powers in HetNet, for example in [6] and [7], so as to reduce interference. More recently, interference alignment was developed as one combination of both interference mitigation categories, i.e., avoidance and cancellation, to simplify interference suppression at the UE receivers owing to some coordination between multiple transmitters that is able to align mutual interference at the receivers. As one example, [8] proposed an interference alignment technique that aims to mitigate DL interference in cellular networks. In the interference cancellation category, an interference rejection combining (IRC) receiver was proposed in [9] to perform spatial suppression of interfering signals. This work investigated the performance gain achieved by the IRC receiver combined with an antenna selection technique in a femtocell co-channel interference scenario.

In this paper, we develop a new strategy for spectrum-sharing downlink interference cancellation (DL-IC). IC has indeed the advantage of being relatively simple in concept by requiring little coordination effort and overhead and by allowing users to transmit simultaneously without the need for any avoidance by scheduling in time and/or frequency, potentially resulting in higher throughput and spectrum efficiency. IC has, however, the only possible drawback of putting some computational burden on the receiver side. The new DL-IC strategy we propose differs from previous IC works in that it relies on new utility functions that maximize SINR, QoS and throughput while putting a price on IC's intensive computing efforts for their minimization.

System-level simulations suggest that the new DL-IC strategy can potentially offer, at low computational cost, as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per

additional femtocell base station in a basic LTE HetNet without IC. These performance figures are shown to surpass those achieved by interference avoidance techniques using either power or frequency resource allocation.

The rest of the paper is organized as follows: We discuss in the next section our system model. In section III, we develop the proposed spectrum sharing DL-IC strategy. In section IV, we confirm by simulations the significant gains achieved in terms of SINR and throughput for both MUEs and FUEs.

2. SYSTEM MODEL

We consider a spectrum-sharing two-layer LTE HetNet comprising a number of outdoor macrocells, each having a fixed number of indoor femtocells deployed within its coverage area. The latter are said to be attached to their femtocell's parent macrocell. We suppose also that each user u from the set of users, denoted by \mathcal{L} , is attached to a femtocell or a macrocell based on the best received signal strength. The received DL signal of this user is severely affected by high interference received from the set of neighboring cells, consisting of both macrocells and femtocells, denoted by J_u . In fact, each user $u \in \mathcal{L}$ computes its received SINR for any given resource block (RB) numbered r, at each transmission time interval (TTI), using the following expression:

$$\gamma_{u,r} = \frac{L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}}{\sum_{j \in J_u} L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx} + \sigma_{u,r}}$$
(1)

where $L_{M,u,i(u),r}$ and $L_{M,u,j,r}$ $(j \in J_u)$ model both the propagation pathloss due to the distance and the antenna gain between the user u and its serving cell i(u) and interfering cell $j \in J_u$, respectively; $L_{S,u,i(u),r}$ and $L_{S,u,j,r}$ model the shadow fading caused by obstacles in the propagation path between the user u and its serving cell i(u) and interfering cell $j \in J_u$, respectively; and $\sigma_{u,r}$ is the power of the additive white Gaussian noise received by user u. Finally, $P_{i(u),r,tx}$ is the transmitted power from the serving cell, i(u), of user u and $P_{j,r,tx}$ is the transmitted power from the interfering cell $j \in J_u$. For the sake of simplifying notations, we adopt the two following compact expressions:

$$P_{u,i(u),r} = L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}$$

and

$$P_{u,j,r} = L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx}$$

where $P_{u,i(u),r}$ and $P_{u,j,r}$ denote the received power from the serving cell i(u) and the neighboring interfering cell $j \in J_u$, respectively. Equation 1 then reduces to:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \,. \tag{2}$$

3. PROPOSED SPECTRUM-SHARING DL-IC STRATEGY

In order to reduce interference and enhance the user's received SINR, the receiver of a given user u should properly cancel the received interfering signals. Consequently, the term $\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r}$, which represents the resulting received interfering power, must be minimized. Analytically, we multiply the received interfering powers by cancellation coefficients to obtain the resulting residual interfering power $\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r}$, where $a_{u,j,r} (j \in J_u)$ are the cancellation coefficients to be determined. Therefore, the post-IC SINR (i.e., resulting SINR after the IC strategy is implemented) is given as follows:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \,. \tag{3}$$

The main purpose of the proposed spectrumsharing DL-IC strategy is to compute the optimal cancellation coefficients that optimize the user's received SINR. In order to achieve this objective, we define for each user u a net utility function $U_{net,u}$ to be maximized. In fact, utility and cost functions were widely used in power and resources allocation algorithms, in addition to some interference alignment solutions. However, to the best of our knowledge, the utility function concept was not previously exploited in IC for HetNet. Furthermore, the utility function maximization allows the user to properly select the received interfering signals to be cancelled and to enhance its received SINR. Therefore, we use the standard definition of a utility function of network base stations which is composed by a utility function U_u that represents the degree of user satisfaction, and a cost function C_u which represents the computational cost incurred. The resulting total utility function $U_{net,u}$ is expressed as follows:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = U_u(\gamma_u) - C_u(\gamma_u).$$
(4)

The cost function is introduced to represent the increasing computational cost incurred by a more accurate cancellation process with reduced implementation errors. Indeed, perfect cancellation [i.e. $a_{u,j,r} = 0$ $(j \in J_u)$] cannot be realized in practice. Even more, very accurate interference cancellation cannot be implemented without requesting a heavy computational burden. For each user $u \in \mathcal{L}$, we use the same following cost function:

$$C_u(\gamma_u) = \beta \gamma_u \tag{5}$$

where β is the pricing parameter to be determined.

In order to determine the optimal values for the cancellation coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$, we must compute the optimal SINR, denoted $\hat{\gamma}_u$, which maximizes the net utility function $U_{net,u}$. Therefore, we use the expression of the cost function in eq. 5 and take the derivative of eq. 4 with respect to the variable γ_u as follows:

$$U'_{u}(\hat{\gamma}_{u}) - \beta = 0 \iff \hat{\gamma}_{u} = U'^{-1}_{u}(\beta).$$
 (6)

Consequently, from eqs. 3 and 6, the cancellation coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$ can be expressed as follows:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{P_{u,i(u),r}}{U'_u^{-1}(\beta)} - \sigma_{u,r} \right]$$
(7)

where j_u is the cardinality of the set of interfering cells $[j_u = Card(J_u)]$.

In eq. 7, we have assumed the received powers from

interfering cells, $P_{u,j,r}$, for any j, to be equal to ease the tractability of eq. 3. This assumption holds when accounting for the averaged received interfering powers over all UE positions. The solution in eq. 7 is then obtained by ultimately substituting the identical averages by their instantaneous realizations obtained at a given UE position. This reasonable approximation simplifies the resolution of eq. 3 and proves later by simulations to be extremely efficient. In the following, we define the utility functions of both the MUE and the FUE.

3.1. MUE utility function and IC coefficients

For each MUE $u \in \mathcal{L}_m$, we define its utility function so as to reflect its degree of satisfaction in terms of QoS as follows [13]:

$$U_{m,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} \tag{8}$$

where \mathcal{L}_m denotes the set of MUEs and α_m is a parameter that controls the steepness of the utility function. It is observed that a higher SINR $\hat{\gamma}_u$ can be realized if $U'_{u,m}$ becomes flatter. This corresponds to choosing a small value of α_m . It should be noted that a similar utility function was proposed in [13] for a distributed power control scheme in wireless cellular systems. Maximization of the utility function there finds the optimum value of the transmission power of each user. In our work, we adopt a similar utility function form in order to calculate the optimal values for the cancellation coefficients and thereby allow proper selection of the interfering signals to be cancelled.

The function $U_{m,u}$ captures the QoS offered to user u. By maximizing the utility function $U_{m,u}$, it is obvious that the MUE is increasingly satisfied by the received QoS. However, the cost function C_u increases by maximizing the utility function. The resulting net utility function is expressed as follows:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} - \beta_m \gamma_u \qquad (9)$$

where β_m corresponds to the parameter β of the MUE. Consequently, using the analytical form of $\hat{\gamma}_u$ in eq. 3, we express the cancellation coefficients

 $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$ of the MUE u as follows:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{\int_{u} P_{u,j,r}} \left[-\frac{\alpha_m P_{u,i(u),r}}{\ln\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1}\right)} - \sigma_{u,r} \right]$$
(10)

However, two necessary conditions must be verified in eq. 10. First, we have to verify that $\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m}-1\right)^2 - 1 \ge 0$. In order to respect this condition, we must define the parameters α_m and β_m with $\alpha_m \ge 4\beta_m$. Furthermore, the second condition requires that $\frac{\alpha_m}{2\beta_m}-1-\sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m}-1\right)^2-1}>0$, which is verified for $\alpha_m > 4\beta_m$. In conclusion, we must minimize as much as possible the parameter α_m to maximize $\hat{\gamma}_{u,r}$ while respecting the condition $\alpha_m > 4\beta_m$. To do so, we have simulated the system for different values of α_m , i.e., $\alpha_m = 4.1\beta_m, 4.2\beta_m, \dots 4.5\beta_m$, etc. We have then noticed that performance improvements saturate beyond $\alpha_m = 4.5\beta_m$. Hence, we chose $\alpha_m = 4.5\beta_m$ then reduced the value of β_m so as to maximize the total network throughput while enhancing the user's experience.

3.2. FUE utility function and IC coefficients

Similar to the MUE, for each FUE $u \in \mathcal{L}_f$, the set of FUEs, we define the following utility function $U_{f,u}$:

$$U_{f,u}(\gamma_u) = W \log\left(1 + \gamma_u\right) \tag{11}$$

where W denotes the system's bandwidth. This utility function captures the Shannon capacity for the FUE. The resulting net utility function to maximize is expressed as follows:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = W \log\left(1 + \gamma_u\right) - \beta_f \gamma_u \qquad (12)$$

where β_f corresponds to the parameter β of the FUE. By maximizing the net utility function $U_{net,u}$, the FUE attempts to enhance its throughput, taking into account the incurred computational price. Using this utility function and eq. 7, we express the coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$ for a FUE $u \in \mathcal{L}_f$ as

Table I: Summary of DL-IC strategy.

follows:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{\beta_f}{W - \beta_f} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right].$$
(13)

Based on the IC coefficients obtained for the MUEs and FUEs in eqs. 10 and 13, respectively, the proposed DL-IC strategy is summarized in Tab. I.

3.3. Implementation issues

The DL-IC strategy proposed in this paper requires a limited amount of measurement reports exchange. In fact, the UE and its serving cell cooperate to build the neighboring cells list, and estimate the path loss between it and its neighboring cells. Moreover, the MUE and its serving macrocell exchange measurement reports to update the list of neighboring cells. The UE receiver is then able to estimate the channel gains exploiting the pilot channels received from these cells and compute the received power from them. However, in the case of FUE, the serving femtocell requires an additional DL receiver to measure the signal from the surrounding base stations. This receiver is called "HeNB sniffer" [17]. The femtocell uses this receiver to measure the co-channel reference signal received power (RSRP) to determine the coverage of surrounding cells. The RSRPs of surrounding base stations are measured also by the FUE and reported to the serving femtocell. Else, the femtocell measures the reference signal transmission power (RSTP) of neighboring cells and estimates the path loss from

the attached FUE to the neighboring macrocells and femtocells.

Furthermore, the cancellation process becomes increasingly complex when selecting a larger number of interfering signals to cancel, called cancellation constraints. In fact, the number of cancellation constraints reflects the implementation complexity of the proposed strategy. Hence, to further limit the computational cost increase in additional support to the effect to the proposed utility functions, we set an upper bound that restricts the number of cancellation constraints. Indeed, the cancellation process is not applied for interfering signals corresponding to cancellation coefficients superior to a pre-defined upper bound, denoted A_u (i.e., if $a_{u,j,r} > A_u$, $a_{u,j,r} = 1$). Likewise, we define a second strategy of cancellation constraints selection. This strategy consists simply in cancelling a prefixed number, N_c , of interfering signals having the lowest cancellation coefficients. Consequently, the UE cancels at most N_c received interfering signals having the lowest IC coefficients $a_{u,j,r}$. Then, our DL-IC strategy's performance and complexity will both depend on N_c . Furthermore, we define a lower bound, denoted A_l , that reflects the cancellation precision. In fact, imperfections due to channel estimation and signals' reconstruction make it impossible to perform a perfect cancellation of the interfering signals at the requested cancellation ratio or coefficient $a_{u,j,r}$. Therefore, A_l represents the minimum suppression ratio achievable due to IC implementation imperfections or the minimum value that a cancellation coefficient can take [i.e., $a_{u,i,r} =$ $\max(A_l, a_{u,j,r})$]. By choosing larger values of A_l , we reduce not only IC precision, but computational cost as well.

4. SIMULATION RESULTS AND ANALYSIS

To evaluate DL-IC strategy and see its impact on network and user performances, we used an LTE network system-level simulator. This simulator generates an area of interest (ROI) composed by 7 hexagonal macrocells. Depending on the

Table II: Simulation parameters.

Parameters	Macrocell	Femtocell		
Carrier	2 GHz			
frequency				
Bandwith	5 MHz (shared)			
N	25 RBs			
	12 subcarriers per RB			
Cell layout	hexagonal	circular cell, 1		
	grid of 7 cells,	sector per cell		
	3 sectors per			
	cell			
Cell size	250 m	20 m		
Antenna gain	TS 36.942	Omnidirectionnal		
pattern				
Max antenna	15 dBi	0 dBi		
gain				
Max Tx	43 dBm	20 dBm		
power				
UE receiver	9 dB	9dB		
noise figure				
Thermal noise	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz		
level				
Pathloss	Cost 231	Indoor Hotspot		
model	urban macro			
Initial UEs	25 UEs	1 UE		
number				
UEs speed	30 Km/h	3 Km/h		
Schedular	Proportional Fair			
Simulation	1000			
time in TTIs				
DL-IC	$\alpha_m = 4.5 \beta_m$	W = 5 MHz		
strategy		$\beta_f = 10^4 \ [14]$		
parameters				

simulation scenario, it randomly populates this ROI by femtocell sites up to a requested average number of femtocells per macrocell. The MUEs are randomly deployed inside each macrocell sector. Each FUE is initially attached to a femtocell. However, during the simulation, each UE can request handover, if necessary, to the cell offering best coverage. The simulation parameters are summarized in Table II.

4.1. Optimization of DL-IC's setup for increased throughput and reduced complexity

We have earlier mentioned that the performance of the DL-IC strategy depends on its tuning, mainly the parameter β_m . In Fig. 2, we simulate the network performance and plot throughput gains for different values of β_m . The obtained results confirm what has been analyzed analytically in section 3. In fact, the



Figure 1: CDF of the number of cancelled interfering signals for different numbers of femtos and different values of A_u .

smaller is the parameter β_m , more significant is the obtained throughput gain. However, this gain cannot be limitlessly enhanced. Actually, simulation results suggest a throughput gain saturation for values of β_m lower than 10^{-3} . Hence, we set in the following simulations the parameter β_m to 10^{-3} . Results of Fig. 2 suggest that throughput gains against a homogenous network without IC are as much as 200% plus an extra 98% per additional femtocell site. Please note that LS, in the figures' legend, refers to the conventional least squares linear regression. We recurred to the LS fit of each throughput curve in the figures knowing well in advance that the expected throughput gain behavior with the number of femtocells increasing should be about linear. The new results obtained here confirm that this linear behavior holds until a relatively large number of



Figure 2: Network throughput gains for different values of β_m ($A_u = 1$; $A_l = 0$).

femtocells.

As mentioned previously in section 3, IC implementation is complex in practice. Thus, we simulate the throughput gains for different values of the upper bound A_u . By reducing the value of A_u , we reduce the number of interfering signals selected for IC thereby reducing implementation complexity. In Fig. 1, we plot the CDF function of the number of interfering signals to be cancelled for different values of A_u to confirm that the number of cancellation constraints indeed reduces with lower values of A_{u} . We notice that when the number of femtocells increases, the number of cancellation constraints still reduces with lower values of A_u . However, the variation is less sensitive to the values of A_u than that for smaller femtocells' number. Results of Fig. 4.1 suggest that as long as A_u is larger than 10^{-2} , there is no performance deterioration compared to perfect IC ($A_u = 1$). For $A_u = 10^{-2}$, the throughput gains against a homogenous LTE network without IC are very significant in the range of 133% plus an extra 85% per additional femtocell site. Compared to a basic HetNet without IC, these gains are still very promising in the range of 133% plus an extra 35% per additional femtocell site. Hence, we set in following simulations the value of A_u to 10^{-2} .



Figure 3: Network throughput gains against a homogeneous LTE network for different values of A_u ($\beta_m = 10^{-3}$; $A_l = 0$).



Figure 4: Network throughput gains against a homogeneous LTE network for different values of A_l ($\beta_m = 10^{-3}$).

In Fig 4.1, we plot now the throughput gain curves for different values of A_l which represents the lowest cancellation ratio due to practical imperfections of IC implementation. They suggest that setting in the following simulations A_l to a maximum practical IC ratio value of 10^{-2} (i.e., -20 dB) results in quite significant throughput gains against a homogenous LTE network without IC, i.e., in the range of 166% plus an extra 78% per additional femtocell site. Compared to a basic HetNet without IC, these gains are still high in the range of 166% plus an extra 28% per additional femtocell site.

In Fig. 5, we evaluate the impact of selecting a fixed number (N_c) of interfering signals to be cancelled on the proposed DL-IC strategy and hence plot the throughput gains for different values of N_c . Results there suggest that limiting the proposed DL-IC to only $N_c = 4$ interfering signals having the lowest cancellation coefficients or ratios results in throughput gains against an LTE homogenous network without IC in the range of 150% plus an extra 70% per additional femtocell site. Compared to a basic HetNet without IC, these gains are still high in the range of 150% plus an extra 20% per additional femtocell site.



Figure 5: Network throughput gains against a homogeneous LTE network for different values of N_c $(\beta_m = 10^{-3}; A_l = 10^{-2}).$

4.2. Comparisons against interference avoidance techniques through power control

In order to further evaluate our DL-IC strategy, now that the proposed DL-IC strategy has been optimized both in throughput performance and implementation cost against a basic HetNet setting without IC, we consider as a first benchmark for performance comparisons, the dynamic DL power control (DL-PC) algorithm for LTE HetNet proposed in [16]. This algorithm aims to reduce interference impact on the users' received SINR by adjusting the transmission power of femtocells to a level comprised between a minimum transmission power P_{min} and a maxmimum transmission power P_{max} . The basic concept of the dynamic DL-PC algorithm is summarized as follows [16]:

$$P_{DL} = max \left(P_{min} , min \left(P_{max} , P_0 + P_{offset} \right) \right)$$
(14)

where P_{DL} denotes the transmission power of the femtocell, P_0 represents the received interference measured by the FUE attached to this femtocell, and P_{offset} is based on the pathloss between this femtocell and its attached FUE [16]. The values of

 P_{min} and P_{max} are set, respectively, to -10 dBmand 20 dBm.

Figure 6: Total network throughputs ($\beta_m = 10^{-3}$).

Figure 7: Network throughput gains against a homogeneous LTE network ($\beta_m = 10^{-3}$).

In Fig. 6, we plot the total network throughput achieved by our DL-IC strategy (with different setups) and by DL-PC [12] and translate them into throughput gains in Fig. 7. We observe in Fig. 8 that DL-PC offers only a modest throughput gain of about 2% per additional femocell site against basic HetNet. In contrast, both proposed DL-IC versions - optimized in terms of performance vs. complexity tradeoff - offer much more significant gains, about the same, and sitting only almost halfway from the potential maximum gains achievable with perfect IC implementation.

Figure 8: Network throughput gains against a basic LTE HetNet without IC ($\beta_m = 10^{-3}$).

4.3. Comparisons against interference avoidance techniques through frequency partitioning

Here, we consider as a second benchmark for comparisons the conventional FFR discussed in [12], without power control on femtocell subbands. Accordingly, we divide the available resources into four subbands f_0 , f_1 , f_2 and f_3 split between the cell center and the edges of the three sectors, respectively. A femto user placed in the cell center can use f_1 , f_2 and f_3 , a femto edge-user placed in sector l uses the subbands $\{f_p\}$, where $p \neq l$.

As a third benchmark, we propose an adaptive subband allocation (ASA) scheme where macrocells use the entire spectrum and femtocells exploit only a fraction of all resources. In this strategy,

 Table III: SINR-based decreasing-order ranking of RBs for victim MUEs.

	Victim MUE index			
RB r	1	2		K
N	$R_{1,N}$	$R_{2,N}$		$R_{K,N}$
•	•	•	•	• •
:	:	:	:	:
2	$R_{1,2}$	$R_{2,2}$		$R_{K,2}$
1	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$		$R_{K,1}$

macro users are classified into safe users and victim users according to the received interference from the corresponding femtocell. For each victim MUE, served by the femtocell's parent macrocell, and given an index k among 1 to K where K denotes the identified number of victim MUEs, we attribute for each of its RBs r = 1, ..., N a decreasing-order SINR-based ranking value $R_{r,k}$ among 1 to N, as illustrated in Tab. III. For each RB index r, we then define in Tab. IV a corresponding score s_r as the average of the ranking values over victim users given in Tab. III. In Tab. V, we ultimately rank the RBs in a decreasing order based on the scores s_r obtained in Tab. IV (i.e., $s_{r_m} < s_{r_{m+1}}$ where r_m denotes the RB index ranked in Tab. V)). In [15], a femto free-zone is defined as a given part of the RBs where femtocells are not allowed to transmit. Here, a femtocell is allowed to determine its freezone characterized by the number B of RBs to be blocked out of N according to the blocking ratio ρ_B as follows:

$$B = \lceil N \times \rho_B \rceil \tag{15}$$

where

$$\rho_B = \frac{K}{N_F + N_M} \tag{16}$$

where N_F and N_M are the numbers of FUEs and MUEs served by the femtocell and its parent macrocell, respectively. The blocked RBs are those having indexes r_1 to r_B at the bottom of Tab. V, i.e., the *B* indexes of the RBs having the lowest scores s_r obtained in Tab. IV.

For each femtocell, the allowed RBs identified in Tab. V are fed to a proportional fair scheduler to be distributed among served FUEs.

RB r	Score
N	$s_N = mean\{\ldots, R_{k,N}, \ldots\}, k \in$
	$\{1,, K\}$
:	:
•	
:	
2	$s_2 = mean\{\ldots, R_{k,2}, \ldots\}, k \in$
	$\{1,, K\}$
1	$s_1 = mean\{\ldots, R_{k,1}, \ldots\}, k \in$
	$ \{1,, K\}$

Table IV: Score per RB based on the average of ranking values over victim MUEs in Tab. III.

Table V: Allowed and blocked femtocell RBs.

$\operatorname{RB} r$	RB status
r_N	
:	allowed
r_{B+1}	
r_B	
:	blocked
r_1	

In Fig. 9, we plot again the total network throughput achieved by our DL-IC strategy (with different setups) and by both FFR and ASA described above, and translate them into throughput gains in Fig. 10. Taking basic HetNet as a reference against which throughput performance is gauged, we observe in Fig. 11 that FFR suffers from throughput losses (due to its rigid frequency partitioning briefly discussed above) while ASA offers only a modest throughput gain of about 3% per additional femtocell site.

5. CONCLUSIONS

In this paper, we proposed a spectrum-sharing DL-IC strategy that permits an LTE HetNet receiver to eliminate the most severe interference received from neighboring cells, both macro and femto. The proposed strategy is based on utility functions not yet exploited for IC in HetNet, to the best of our knowledge. These functions permit

Figure 9: Total network throughputs ($\beta_m = 10^{-3}$).

Figure 10: Total network throughput gains against a homogeneous LTE network ($\beta_m = 10^{-3}$).

to relax cancellation coefficients in order to reduce the implementation complexity and compute the optimal cancellation coefficients values for each interfering signal in order to enhance SINR, QoS and throughput. We prove by system-level simulations

Figure 11: Network throughput gains against a basic LTE HetNet without IC ($\beta_m = 10^{-3}$).

that the suggested spectrum-sharing DL-IC strategy is able to improve the LTE HetNet network throughput and to enhance the users' received SINRs. In fact, throughput gains achievable by the new spectrum-sharing DL-IC strategy can reach as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per additional femtocell base station in a basic LTE HetNet without IC. These performance figures are shown to surpass those achieved by interference avoidance techniques using either power or frequency resource allocation.

REFERENCES

- 1. ITU, World Telecommunication ICT Indicators Database. June, 2012.
- Landstrom S., Furuskar A., Johansson K., Falconetti L., Kronestedt F., *Heterogeneous Networks : Increasing Cellular Capacity.* 2011. Ericsson.
- 3. 3GPP T R 36.814 V9.0.0 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9), March 2010.
- Saquib N., Hossain E., Long B.L., Dong I.K., Interference Management in OFDMA

Femtocell Networks: Issues and Approaches. IEEE Transactions on Wireless Communications 2012,June; 19(3): 86-95.

- Damnjanovic A., Montojo J., Yongbin W., Tingfang J., Tao L., Vajapeyam M., Taesang Y., Osok S., Malladi D., A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks. IEEE Wireless Communications 2011, June; 18(3): 10-21.
- Chandrasekhar V., Andrews J.G., Muharemovic T., Zukang S., Gatherer A., *Power Control in Two-Tier Femtocell Networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications 2009, August; 8(8): 4316-4328.
- Dong-Chan O., Heui-Chang L., Yong-Hwan L., *Power Control and Beamforming for Femtocells* in the Presence of Channel Uncertainty. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2011, July; 60(6): 2545-2554.
- Changho S., Ho M., Tse D.N.C., *Downlink Interference Alignment*. IEEE Transactions on Communications 2011, September; 59(9): 2616-2626.
- Dao N.D., Soler-Garrido J., Cepeda R., Sun Y., Chin W.H., Design and Evaluation of Antenna Selection Methods for Interference Rejection Combining. IEEE Transactions on Wireless Communications 2012, August; 11(8): 2751-2759.
- Boudreau G., Panicker J., Guo N., Chang R., Wang N., Vrzic S., Interference Coordination and Cancellation for 4G Networks. IEEE Communications Magazine 2009, April; 47(4): 74-81.
- Chandrasekhar V., Andrews J.G., Femtocell Networks: A Survey. IEEE Communications Magazine 2008; 46(9): 59-67.
- Rangan S., Femto-Macro Cellular Interference Control with Subband Scheduling and Interference cancellation. IEEE Globecom 2010, July; 695-700.
- Xiao M., Shroff N.B., Chong E.K.P., A Utility-Based Power-Control Scheme in Wireless Cellular Systems. IEEE/ACM Transactions on Networking. 2003, April; 11(2): 210-221.
- Duy T.N., Long B.L., Le-Ngoc T., Hossain E., Dong I.K., Distributed Interference Management in Two-Tier CDMA Femtocell Networks. IEEE

Transactions on Wireless Communications 2012, March; 11(3): 979-989.

- Kaimaletu S., Krishnan R., Kalyani S., Akthar N., Ramamurthi B., Cognitive Interference Management In Heterogeneous Femto-Macro Cell networks. IEEE International Conference on Communnications 2011, August; 1-6.
- Lin Y. Pingping W., Location Based Autonomous Power Control for ICIC in LTE-A Heterogeneous Networks. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2011; 1-6.
- Jie Z., de la Roche G., *Femtocells: Technologies and Deployment*. ISBN: 978-1-119-96565-7, September 2011.

Articles de conférences publiés ou acceptés:

R. Nasri, S. Affes, and A. Stèphenne, "Combined Interference Cancellation and Avoidance Over the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNet", *Proc. ICUWB*, October 2015.

Combined Interference Cancellation and Avoidance Over the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNet

Raouia Nasri¹, Sofiène Affes¹, and Alex Stéphenne^{1,2}

1: INRS, EMT Centre, 800 De La Gauchetire W., Suite 6900, Montreal, H5A 1K6, QC, Canada

2: Ericsson Canada, 349 Terry Fox Drive, Ottawa, K2K 2V6, ON, Canada

{nasri,affes}@emt.inrs.ca, stephenne@ieee.org

Abstract-In a spectrum-sharing heterogeneous network (HetNet), lowpower small cells such as femtocells are deployed jointly with macrocells. This new cell layer generates interference that degrades network performance. To mitigate this critical issue in HetNets, we combine both interference cancellation and interference avoidance to benefit from their respective advantages on the downlink of LTE (Long Term Evolution). On one hand, a new downlink interference cancellation (DL-IC) strategy reduces the interference impact on users by optimizing their received signal to interference plus noise ratio (SINR). On the other hand, a new low-power almost-blank subframes (LP-ABS) policy minimizes the effect of downlink interference on femtocells and neighboring macrocells by reducing the transmit power of macrocells during special subframes. When implementing DL-IC and LP-ABS separately, system-level simulations do suggest that both global network performance and user experience in terms of total throughput and received SNR or link-level throughput, respectively, are significantly enhanced, indeed. However, much more significant gains both in performance and complexity can be achieved by combining newly proposed DL-IC and LP-ABS interference mitigation strategies.

Index Terms-LTE, HetNet, Femto, Interference, Avoidance, Cancellation.

I. INTRODUCTION

HetNet integrates small coverage cells such as femtocells, picocells, or microcells and small nodes such as relay nodes, in conjunction with the existing macrocells. These small nodes are supposed to extend the range and improve the spatial frequency reuse to deliver a better user experience. In our case, we are interested in femtocells which have recently emerged as a promising approach to enhance wireless systems' capacity and to extend the macrocellular range. Femto base stations are low-power base stations owned and installed by the customer inside buildings such as homes, enterprises, shopping malls, metro stations, hospitals, etc [1] where more than 50% of voice calls and more than 70% of data traffic are generated; facts that emphasize their advantage of promoting indoors communications.

However, the ad-hoc femtocells' deployment raises new technical challenges and cross-tier interference related problems that result into unprecedented interference scenarios. Consequently, the new network's structure modifies the interference profile in drastic way that hampers some victim users' connectivity.

Downlink interference mitigation in LTE HetNets are mainly categorized into interference cancellation (typically at the receiver), interference avoidance (typically at the transmitter), and interference alignment. In the latter category, interference coordination or avoidance was widely presented as an efficient approach that applies restrictions on power, time and/or frequency resource management in a coordinated way between cells. Several interference coordination techniques for HetNets [2] mainly divide available resources between macrocells and

¹Work supported by the Discovery Grants and the CREATE PERSWADE $\langle www.create - perswade.ca \rangle$ programs of NSERC and a Discovery Accelerator Supplement (DAS) Award from NSERC.

femtocells in the time-frequency grid.

Avoidance techniques were widely used to manage interference, among them power control and frequency reuse techniques. Power control algorithms were developed in order to optimize base stations' transmission powers in HetNets [4]. Conventional fractional frequency reuse (FFR) divides the available spectrum into several subbands and assigns them to the cells in such a way that interference is reduced. The adaptive FFR was adopted in several works [3] by updating subband allocation in a dynamic way properly adjusted to the interference levels so as to achieve even higher SINRs while allowing much better spectrum usage.

Interference alignment (IA) was recently proposed as a cooperative transmission technique [5] that implements precoding matrices at all transmitters to align the interference and confine it in the smallest subspace possible at the receiver side to give the desired signal more degrees of freedom. IA is a powerful technique that was widely studied for homogeneous networks (e.g., [6]). Later, some works focused on IA for HetNets (e.g., [7]). However, IA needs cooperation between the transmitter and the receiver to suppress interference that entails a huge computational cost to find the IA solution over each subcarrier making it unpractical for dense systems with many transmitter/receiver pairs. In [5], for instance, IA was studied only at the link level and only for a simple scenario of a small number of users.

Here, we consider an approach similar to IA in that it also involves interference mitigation at both the transmitter and receiver sides, yet by adopting avoidance instead of precoding at the former and lowcost suppression at the latter without any costly information exchange required in between. At the receiver side, we develop a new strategy for spectrum-sharing downlink interference cancellation (DL-IC). IC has indeed the advantage of being relatively simple in concept by requiring little coordination effort and overhead and by allowing users to transmit simultaneously without the need for any avoidance by scheduling in time and/or frequency, potentially resulting in higher throughput and spectrum efficiency. IC has, however, the only possible drawback of putting some computational burden on the receiver side. Our proposed DL-IC strategy differs from previous IC works in that it relies on new utility functions that maximize SINR, QoS and throughput while putting a price on IC's intensive computing efforts for their minimization.

At the transmitter side, we develop a new interference avoidance technique based on the so-called "blank subframes" concept which periodically mutes the macrocells' transmissions during some subframes' duration. In this concept, macrocells are deprived from transmitting data during a number of subframes. Recently, few works considered data transmission with reduced macrocell's power, referred to as "almost blank subframes" (ABS). Here, we propose a new dynamic low-power ABS (LP-ABS) where the macrocell power is no longer muted but reduced to properly adjusted levels that depend on the channel state and, hence, the received interference.

When implementing DL-IC and LP-ABS separately, system-level simulations do suggest that both global network performance and user experience in terms of total throughput and received SNR or link-level throughput, respectively, are significantly enhanced, indeed. However, much more significant gains both in performance and complexity can be achieved by combining the newly proposed LD-IC and LP-ABS interference mitigation strategies.

II. SYSTEM MODEL

We consider a spectrum-sharing two-tier LTE HetNet comprising a number of outdoor macrocells, each having a fixed number of indoor femtocells deployed within its coverage area. The latter are said to be attached to their femtocell's parent macrocell. We suppose also that each user u from the set of users, denoted by \mathcal{L} , is attached to a femtocell or a macrocell based on the best received signal strength. The received DL signal of this user is severely affected by high interference received from the set of neighboring cells, consisting of both macrocells and femtocells, denoted by J_u . In fact, each user $u \in \mathcal{L}$ computes its received SINR for any given resource block (RB) numbered r, at each transmission time interval (TTI), using the following expression:

$$\gamma_{u,r} = \frac{L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}}{\sum_{j \in J_u} L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx} + \sigma_{u,r}}$$
(1)

where $L_{M,u,i(u),r}$ and $L_{M,u,j,r}$ $(j \in J_u)$ model both the propagation pathloss due to the distance and the antenna gain between the user u and its serving cell i(u) and interfering cell $j \in J_u$, respectively; $L_{S,u,i(u),r}$ and $L_{S,u,j,r}$ model the shadow fading caused by obstacles in the propagation path between the user u and its serving cell i(u)and interfering cell $j \in J_u$, respectively; and $\sigma_{u,r}$ is the power of the additive white Gaussian noise received by user u. Finally, $P_{i(u),r,tx}$ is the transmitted power from the serving cell, i(u), of user u and $P_{j,r,tx}$ is the transmitted power from the interfering cell $j \in J_u$. For the sake of simplifying notations, we adopt the two following compact expressions:

 $P_{u,i(u),r} = L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}$ $P_{u,j,r} = L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx}$

and

where $P_{u,i(u),r}$ and $P_{u,j,r}$ denote the received power from the serving cell i(u) and the neighboring interfering cell $j \in J_u$, respectively. Equation 1 then reduces to:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \,. \tag{2}$$

III. INTERFERENCE MITIGATION TECHNIQUES

Since femtocells operate in the same licensed spectrum owned by the macrocellular service provider, it is crucial to develop robust interference mitigation techniques to handle the cross-tier interference. These schemes should guarantee the QoS requirements of the existing macro-users and effectively enhance the overall system performance with the newly-deployed femto-users. Both interference avoidance and interference cancellation techniques promise to enhance the overall system capacity. Interference cancellation has been considered in many works as a highly performing technique surpassing interference avoidance techniques at the expense of increased complexity at the receiver side. Interference avoidance offers relatively lower yet interesting capacity enhancement at relatively lower implementation costs at the transmitter side, especially on the downlink. In this work, precisely, we propose a novel joint exploitation of both interference mitigation techniques: The first, recently developed by the authors in [8] and referred to as DL-IC, is based on cancellation at the receiver (cf. section III-A below). While the second, newly developed here and referred to as LP-ABS, is based on avoidance, at the transmitter (cf. section III-B). Even though each solution offers separately significant improvements, we advocate here an ad hoc yet novel combination of both (cf. section III-C) that achieves a much better trade-off between computational costs and performance gains and that outperforms each new technique when implemented separately (cf. section IV).

A. DL-IC interference cancellation at the receiver

To reduce the interference and enhance the user's received SINR, we consider the spectrum-sharing DL-IC strategy, the interference cancellation technique that we proposed in [8]. The receiver of a given user u should properly cancel the received interfering signals. Consequently, the term $\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r}$, which represents the resulting received interfering power, must be minimized. To do so, the received interfering powers are multiplied by cancellation coefficients to obtain the resulting residual interfering power $\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r}$, where $a_{u,j,r}$ ($j \in J_u$) are the cancellation coefficients to be determined. Therefore, the resulting SINR after the IC strategy is implemented is the expressed as follows:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \,. \tag{3}$$

The spectrum-sharing DL-IC strategy is mainly based on computing the optimal cancellation coefficients in order to optimize the user's received SINR. To achieve this goal, a net utility function $U_{net,u}$ has to be maximized for each user u.

More details about utility functions expressions and implementation were described in [8] and the references therein.

B. LP-ABS interference avoidance at the transmitter

Interference avoidance techniques are interesting since they are implemented at the base station and hence do not involve directly the user equipment in resource management. In this work, we consider a time-domain resource management technique based on muting the macrocells' effective transmission during a certain time. This technique has been specified by the 3GPP/LTE organization as Almost Blank Subframe (ABS) since Release 10 [13].

In conventional time-domain muting solutions, the base station does not transmit any signal during the muted subframe, meaning that the base station power is nulled. In this case, the scheme is called zero ABS. In Release 11, enhanced Inter-Cell Inerference Coordination (eICIC) techniques were addressed [11] with reduced power at the base station labeled as low-power ABS [12]. Being a newly addressed topic, ABS is still under investigation [13], [14], [15], [16].

In this work, we consider a LP-ABS scheme applied to a HetNet whith macrocells and femtocells. We consider to reduce the macrocell's power since the latter can exploit the X2 interface. We do so also because the femtocell power is already too low compared to the macrocell's. Hence, its effect is less significant than the interference received from macro aggressors.

In our scheme, we consider a macro-femto cellular network where the femto users are scheduled all the running time with the same maximum permitted femtocell's power. The macro users are scheduled with full maximum allowed macro power only in the permitted subframes called non ABS-subframes.

We define the ABS subframes with a muting period M_G and a muting

ratio M_f . By muting period, we refer to each M_G subrames portion over the total number of subframes where we consider LP-ABS. The subframes with LP-ABS are the first $M_G \times M_f$ of each portion of M_G subframes. Fig. 1 illustrates the LP-ABS scheme.

During the LP-ABS subframes, the macro base station transmits with a reduced power dynamically adjusted to the channel status observed in the previous subframes and the experienced interference. At the end of each subframe, the user sends feedback information to the base station about its current COIs (Channel Quality Indicators) which indicate the modulation and the coding schemes (MCSs) used in the last TTI (Transmit Time Interval) at every RB. These MCSs translate the channel state seen by each user. Then, the base station gathers the CQIs fed from all its attached users and gets the maximum CQI, CQI_{max} , and the minimum CQI, CQI_{min} , over all attached users and all RBs. Having these two values, the base station is able to adjust its power according to the channel state and the interference in such a way that the reduced power does not affect the QoS at macrocells. When the macrocell experiences a high interference level and the UE reports a high MCS, its power should not be reduced too much. And when it experiences low interference and the UE reports low MCS, the power should be reduced considerably [19]. For each CQI range, we associate a power range value for the power reduction denoted as P_{range} . We summarize the CQI to P_{range} translation in Table I.

TABLE I SUMMARY OF LP-ABS STRATEGY.

 $\begin{array}{l} P_{range} = \{ \mathrm{P1}, \mathrm{P2}, \mathrm{P3} \} \\ \text{if cqi} \in \{1, 2, \ldots, 6\} \\ CQI_{range}(cqi) = 1, \text{ relative to QPSK modulation} \\ P_{range}(1) = P1 \\ \text{if cqi} \in \{7, 8, 9\} \\ CQI_{range}(cqi) = 2, \text{ relative to 16-QAM modulation} \\ P_{range}(2) = P2 \\ \text{if cqi} \in \{10, 11, \ldots, 15\} \\ CQI_{range}(cqi) = 3, \text{ relative to 64-QAM modulation} \\ P_{range}(3) = P3 \end{array}$

 ϵ

At ABS subframes, the macro base station power, at each sector s, is dynamically updated as follows:

$$eNB_{pw}(s)[dBm] = -P_{range}(CQI_{range}^{min}(s)) + max(P_{min}, min(P_0 + P_{offset}, P_{max}))$$
(4)

where $eNB_{pw}(s)$ refers to the newly computed linear power for sector

Fig. 1. LP-ABS subframes period and ratio illustration.

s of the eNodeB and

$$CQI_{range}^{min}(s) = CQI_{range}(CQI_{min})$$
$$CQI_{range}^{max}(s) = CQI_{range}(CQI_{max})$$

and P_{max} , P_{min} , P_0 (the received interference), and P_{offset} (the pathloss degradation between the eNodeB and attached users) are defined as:

$$P_{max} = 10 \times log10(eNB_{pw}^{tx}) + P_{range}(CQI_{range}^{max}(s))$$
(5)

$$P_{min} = 10 \times log 10 (eNB_{min}^{tx}) - P_{range}(CQI_{range}^{min}(s))$$
(6)

$$P_0 = 10 \times log10(eNB(s)_{interf}) + P_{range}(CQI_{range}^{max}(s))$$
(7)

$$P_{offset} = 10 \times log10(eNB(s)_{pathloss})$$
(8)

where eNB_{pw}^{tx} is the maximum power allowed for the macro base station, $eNB(s)_{interf}$ is the received interference at sector s of the macro eNB and $eNB(s)_{pathloss}$ stands for the macroscopic pathloss degradation.

This expression reduces the eNodeB's transmission power during the ABS subframes instead of nulling it. Actually, we compensate the loss due to the received interference minus the allowed power reduction relative to the most sensitive MCS case

C. Combined DL-IC at the receiver and LP-ABS at the transmitter

Here, we propose a combination of both DL-IC and LP-ABS strategies previously detailed. Considering the robustness of DL-IC and the high throughput gains it achieves, we intend through this combination to keep the same performance or even to surpass it at lower complexity.

The performance of DL-IC [8] is proportional to the number of signals to cancel, referred to as the number of constraints. Hence, high performance achievement is too costly and implies high computational burden at the receiver side. When combining the proposed interference cancellation and avoidance techniques, we alleviate the computational charge at the receiver side by reducing the number of constraints. Thus, the resulting loss in performance is compensated by interference avoidance at the transmitter side without the very demanding requirement of any additional information exchange with the receiver, in blunt contrast to interference alignment approaches. Consequently, the transmitter and the receiver carry out interference independently as described in Table II. On one side, during the LP-ABS subframes, the transmitter adjusts dynamically its power with regards to the channel status observed in the previous subframes and the experienced interference. On the other side, the receiver cancels the interfering signals with DL-IC.

TABLE II SUMMARY OF COMBINED DL-IC/LP-ABS STRATEGY.

if TTI=0
Transmitter: power = eNB_{pw}^{tx}
Receiver performs DL-IC and sends feedback(TTI=0)
else
if subframe is not LP-ABS subframe
Transmitter: power = eNB_{pw}^{tx}
Receiver performs DL-IC and sends feedback(TTI)
else
Transmitter performs LP-ABS(feedback(TTI-1)), power com-
puted
as in section III-B
Receiver performs DL-IC and sends feedback(TTI)
end
end

Parameters	Macrocell	Femtocell		
Carrier frequency	2 GHz			
Bandwith	5 MHz (shared)			
N	25 RBs			
	12 subcarriers per RB			
Cell layout	hexagonal grid of	circular cell with 1		
	7 cells with 3	sector		
	sectors each			
Cell size	250 m	20 m		
Antenna gain pattern	TS 36.942	Omnidirectionnal		
Max antenna gain	15 dBi	0 dBi		
Max Tx power	43 dBm	20 dBm		
UE receiver noise figure	9 dB	9 dB		
Thermal noise level	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz		
Pathloss model	Cost 231 urban	Indoor hotspot		
	macro			
Initial UEs number	25 UEs	1 UE		
UEs speed	30 Km/h	3 Km/h		
Schedular	Proportional fair			
Simulation time in TTIs	1000			
DL-IC strategy parameters	$\alpha_m = 4.5\beta_m$	$W = 5 \text{ MHz} \beta_f =$		
		10^4 [18]		
	$[P1 \ P2 \ P3] = [6 \ 3 \ 0] \ (dB)$			
LP-ABS strategy parameters	$M^{\cdot}G = 10$ subframes			
	M f = 2%			

TABLE III SIMULATION PARAMETERS.

IV. EVALUATION OF THE PROPOSED INTERFERENCE MITIGATION STRATEGIES

A. Simulation setup

To evaluate the performance of our proposed interference mitigation strategy, combined DL-IC and LP-ABS, we used an LTE network system-level simulator. This simulator generates a region of interest (ROI) composed of 7 hexagonal macrocells. Depending on the simulation scenario, it randomly populates this ROI by femtocell sites up to a requested average number of femtocells per macrocell. The MUEs are randomly deployed inside each macrocell sector. Each FUE is initially attached to a femtocell. However, during the simulation, each UE can request handover, if necessary, to the cell offering best coverage. The simulation parameters are summarized in Table III.

B. Simulation results and analysis

In this section, we evaluate the proposed interference mitigation strategies by simulations. To do so, we proceed by studying each technique apart to isolate their strengths and weaknesses. Then, we assess the advantages of their combination in terms of performance enhancement and complexity reduction.

1) DL-IC evaluation: In [8], we studied our DL-IC strategy and we evaluated its performance. We showed that DL-IC depends on several tuning parameters, assessed the impact of the latter on performance, and optimized their values to maximize throughput. For more detailed results, the readers can refer to [8]. Simulations showed that DL-IC enhances considerably the system performance compared to a homogeneous network and a HetNet without DL-IC.

To confirm the robustness of DL-IC strategy, after it has been optimized both in throughput performance and implementation cost against a basic HetNet setting without IC, we considered benchmark techniques for performance comparisons, namely the dynamic DL power control (DL-PC) algorithm for LTE HetNet proposed in [17], the conventional FFR without power control on femtocell subbands. Then, we proposed as a third benchmark, an adaptive subband allocation (ASA) scheme where macrocells use the entire spectrum and femtocells exploit only a fraction of all resources. ASA was described in [9]. Results of comparisons were presented in [8] and [9].

In Fig. 2, we plot the total network throughput achieved by our DL-IC strategy (with different setups) and by DL-PC, FFR and ASA, and translate them into throughput gains in Fig. 3. Taking basic HetNet as a reference against which throughput performance is gauged, DL-PC offers only a modest throughput gain of about 2% per additional femocell site against basic HetNet. We observe in Fig. 4 that FFR suffers from throughput losses (due to its rigid frequency partitioning) while ASA offers only a modest throughput gain. In contrast, both proposed DL-IC versions - optimized in terms of performance vs. complexity tradeoff offer much more significant gains, about the same, and sitting only almost halfway from the potential maximum gains achievable with perfect IC implementation.

Fig. 3. Total network throughput gains against a homogeneous LTE network $(\beta_m = 10^{-3})$.

2) LP-ABS evaluation: In the following, we evaluate the performance of our LP-ABS strategy alone. LP-ABS reduces the interference at both macro and femto users leads to total system capacity enhancement. We compare LP-ABS to the previously described benchmark strategies and the conventional zero-power ABS (ZP-ABS). With ZP-ABS, the macrocell does not transmit during the muted subframe [12]. We show, in Fig. 5, that our proposed resource management strategy gives better results than the benchmark schemes. This makes LP-ABS a promising technique, mainly because it does not overload the system

Fig. 4. Network throughput gains against a basic LTE HetNet without IC $(\beta_m = 400^{-3})$

Fig. 5. DL-ABS performance compared to benchmark strategies through total network throughput.

with extra feedback exchange being a transmitter-based process that reliefs the receiver's computational burden and battery consumption.

3) Combined DL-IC/LP-ABS performance evaluation: As showed in the previous section, LP-ABS is a promising technique to enhance the system's performance with low complexity. Here, we evaluate the performance of LP-ABS combined with DL-IC to benefit from their respective strengths.

First, we evaluate the performance of both DL-IC and LP-ABS strategies for different numbers of femtocells. We notice from Fig. 6 that LP-ABS outperforms DL-IC for $N_c = 1$ and equates it for $N_c = 2$ with 5 and 10 femtocells per macrocell. We confirm this observation in Fig. 7 where we present the variation of LP-ABS and DL-IC (for $N_c = 1$, $N_c = 2$ and $N_c = 4$). This behavior supports unambiguously our idea of combining LP-ABS and DL-IC to reduce the number of cancellation constraints. The capacity loss resulting from reducing the number of constraints of DL-IC can be compensated through LP-ABS with interference avoidance at the transmitter.

Then, we study the behavior of LP-ABS when combined with DL-IC. Results in Fig. 8 suggest that combined LP-ABS/DL-IC strategy gives a capacity enhancement of 42.3% and 12.35% for $N_c = 1$ and $N_c = 6$, respectively, compared to DL-IC alone with 5 femtocells per macrocell. We notice that the gain decreases with N_c increasing due to the significant gains of DL-IC with large cancellation constraints. In fact, DL-IC is able to suppress even more interfering signals with

Fig. 6. DL-ABS performance compared to IC versus N_c .

Fig. 7. DL-ABS performance compared to DL-IC versus the number of femtocells.

Fig. 8. Combined DL-ABS/DL-IC performance compared to DL-IC versus the number of constraints.

relatively larger constraint numbers. We also notice that the gain decreases when increasing the number of femtocells, as expected, since the number of users attached to the eNodeBs and hence the interference from macrocells, respectively.

At 5 femtocells per macrocell, the combined LP-ABS/DL-IC with $N_c = 3$ exceeds DL-IC with $N_c \geq 3$. These results suggest that minimizing the number of cancellation constraints leads to lower

complexity at the user equipment, yet with better system performance than the one achieved by DL-IC alone. Clearly, our combined DL-ABS/DL-IC strategy gives remarkable throughput gains at relatively lower computational complexity.

V. CONCLUSION

In this paper, we proposed a new combination of interference cancellation and interference avoidance techniques: the first is as highly robust as intricate while the second is relatively less efficient but simpler. When combined together, their strengths nicely compensate for their weaknesses resulting thereby in a novel best-of-the-twoworlds interference mitigation technique. Simulation results suggest that our new combined LP-ABS/DL-IC strategy can reduce the number of cancellation constraints, and so the complexity, while still achieving better throughput performance. The gains are significantly important, especially with relatively lower cancellation constraints and lower femtocell's density, and still significant with relatively high numbers of femtocells.

REFERENCES

- M. S. Kim, H. Je, and F. A. Tobagi, "Cross-Tier Interference Mitigation for Two-Tier OFDMA Femtocell Networks with Limited Macrocell Information", *Proc. Globecom*, 2010.
- [2] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, and D. I. Kim, "Interference Management in OFDMA Femtocell Networks: Issues and Approaches", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 3, pp. 86-95, June 2012.
- [3] G. Boudreau, J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang, and S. Vrzic, "Interference Coordination and Cancellation for 4G Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 74-81, April 2009.
- [4] D. C. Oh, H. C. Lee, and Y. H. Lee, "Power Control and Beamforming for Femtocells in the Presence of Channel Uncertainty", *IEEE Transactions* on Vehicular Technology, vol. 60, no. 6, pp. 2545-2554, July 2011.
- [5] R. Jörg and R. Markus, "Interference Alignment in UMTS Long Term Evolution", Proc. EUSIPCO, pp. 1090-1094, 2011.

- [6] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference Alignment and Spatial Degrees of Freedom for the k-User Interference Channel", *Proc. ICC*, pp. 971-975, 2008.
- [7] A. Danish, M. Mustansir, and W. Andreas, "Multi User Inter Cell Interference Alignment in Heterogeneous Cellular Networks", *Proc. VTC*, pp. 1-5, 2014.
- [8] A. Latrach, R. Nasri, and S. Affes, "Downlink Interference Cancellation Strategy for Shared-Spectrum LTE HetNet", *Proc. IWCMC*, pp. 1809-1815, 2013.
- [9] R. Nasri, A. Latarch, and S. Affes, "Throughput and Cost-Efficient Interference Cancellation Strategies for the Downlink of Spectrum-Sharing LTE HetNets", Wireless Communications and Mobile Computing, October 2014.
- [10] L. Gao, H. Tian, P. Tian, J. Zhang, and M. Wang, "A Distributed Dynamic ABS Ratio Setting Scheme for Macro-Femto Heterogeneous Networks", *Proc. ICC*, pp. 1221-1225, 2013.
- [11] A. Khandekar, N. Bhushan, J. Tingfang, and V. Vanghi, "LTE-Advanced: Heterogeneous Networks", *Proc. EW*, pp. 978-982, 2010.
- [12] B. Soret and K. I. Pedersen, "Macro Transmission Power Reduction for HetNet Co-Channel Deployments", *Proc. Globecom*, pp. 4126-4130, 2012.
 [13] 3GPP R1-120768, *Discussion on the Features and Signaling Support for*
- Non-Zero Transmit Power ABS, Fujitsu, 3GPP RAN1#68, February 2012.
- [14] 3GPP R1-120223, Potential Issues Regarding Low Power ABS, Panasonic, 3GPP RAN1#68, February 2012.
- [15] 3GPP R1-120223, Reduced Transmission Power ABS Concept Considerations, Nokia Siemens Networks, Nokia, 3GPP RAN1#68, February 2012.
- [16] 3GPP R1-113635, Performance Evaluation of FeICIC with Zero and Reduced Power ABS, Huawei, HiSilicon, 3GPP RAN1#68, February 2012.
- [17] L. Yang and P. Wen, "Location Based Autonomous Power Control for ICIC in LTE-A Heterogeneous Networks", Proc. Globecom, pp. 1-6, 2011.
- [18] T. N. Duy, B. L. Long, T. Le-Ngoc, E. Hossain, and I. K. Dong, "Distributed Interference Management in Two-Tier CDMA Femtocell Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 979-989, March 2012.
- [19] S. Ahmadi, LTE-Advanced: A Practical Systems Approach to Understanding 3GPP LTE Releases 10 and 11 Radio Access Technologies, Academic Press, 2013.

124

A. Latrach, R. Nasri and S. Affes, "Downlink interference cancellation strategy for shared-spectrum LTE HetNet", 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2013, pp. 1809-1815.

Downlink Interference Cancellation Strategy for Shared-Spectrum LTE HetNet

(Invited Paper)

Ahmed Latrach, Raouia Nasri, and Sofiène Affes

INRS-EMT, 800, de la Gauchetière W., Suite 6900, Montreal, QC, H5A 1K6, Canada E-mails: {latrach, nasri, affes}@emt.inrs.ca

Abstract-In a heterogeneous network (HetNet), femtocells are deployed jointly with macrocells. This new cells' layer added to the network generates interference which would hamper neighboring macro user equipment (MUE) and femto user equipment (FUE) transmissions. In fact, this interference results in degradation of the network performance. In this paper, we propose a downlink interference cancellation (DL-IC) strategy for shared-spectrum LTE (Long Term Evolution) HetNet. This DL-IC strategy aims to reduce the interference impact on users by optimizing their received signal to interference plus noise ratio (SINR) using new utility functions for both FUEs and MUEs. These utility functions allow relaxation of the cancellation ratios in order to reduce implementation complexity while maximizing SINR, QoS and throughput. We support by different systemlevel simulations that both global network performance and user experience in terms of total throughput and received SNR or link-level throughout, respectively, are significantly enhanced. Throughput gains achievable by the new DL-IC strategy can reach as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per additional femtocell base station in a basic shared-spectrum LTE HetNet without IC.

Index Terms—LTE HetNet, Femtocell, Macrocell, DL interference, Cancellation, SINR, Throughput.

I. INTRODUCTION

Mobile communication systems undergo constant growth in terms of number of subscribers. In fact, the ITU organisation confirms that by the end of 2011 the number of mobile services subscribers reached 6 billion around the world, with a penetration factor of 86% [1]. In addition, these users require increasingly better quality of service and a wide coverage characterized by a strong signal, specifically in low coverage areas.

To cope with these challenges, a new concept of Heterogeneous Network (HetNet) was adopted. In HetNet, the network integrates small coverage cells, called femtocells, in conjunction with the existing macrocells. This new cells' layer has been adopted by many wireless communication systems to increase their capacity, to maintain their coverage and to meet the quality of service (QoS) requested by their customers [2]. Among these systems, Long Term Evolution (LTE) developed by 3rd Generation Partnership Project (3GPP) has envisaged femtocells since release 8, with more complete specifications

Work supported by a Canada Research Chair in Wireless Communications and the Discovery Grants Program of NSERC.

in LTE release 10 (LTE-Advanced) [3]. However, these new cells generate more interference that hampers some victim users' connectivity. Consequently, several research efforts are underway to address this crucial problem and thereby allow full exploitation of the potential benefits of HetNet without hindering the network's performance.

Several research works have tackled the issue of DL interference in LTE HetNet network with different approaches. Interference coordination was widely presented as an efficient approach that applies restrictions on DL time and frequency resources management in a coordinated way between cells. Several interference coordination techniques for HetNet were discussed in [4] and [5]. Likewise, power control algorithms were widely developped in order to optimize base stations' transmission powers in HetNet, for exemple in [6] and [7]. More recently, interference alignment was developed to simplify interference suppression at the UE receivers owing to coordinate between multiple transmittersthat is able to align mutual interference at the receivers. For example, [8] proposed an interference alignment technique that aims to mitigate DL interference in cellular networks. Furthermore, an interference rejection combining (IRC) receiver was proposed to perform spatial suppression of interfering signals in [9]. The latter investigated the performance gain achieved by the IRC receiver combined with an antenna selection technique in a femtocell co-channel interference scenario.

In this paper, we develop a new strategy for shared-spectrum DL-IC. IC has indeed the advantage of being relatively simple in concept by requiring little coordination effort and overhead and by allowing users to transmit simultaneously without the need for any avoidance by scheduling in time and/or frequency, potentially resulting in higher throughput and spectrum efficiency. IC has, however, the only possible drawback of putting some computational burden on the receiver side. The new DL-IC strategy we propose differs from previous IC works in that it relies on new utility functions that maximize SINR, QoS and throughput while putting a price on IC efforts for their minimization. System-level simulations suggest that the new DL-IC strategy can potentially offer, at low computational cost, as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per additional femtocell base station in a basic LTE HetNet without IC.

The rest of the paper is organised as follows: We discuss in the next section our system model. In section III, we develop the proposed shared-spectrum DL-IC strategy. In section IV, we confirm by simulations the significant gains achieved in terms of SINR and throughput of both MUEs and FUEs.

II. SYSTEM MODEL

We consider a shared-spectrum HetNet LTE network composed by two different cell layers: outdoor macrocells and indoor femtocells. We suppose also that each user u from the set of users, denoted by \mathcal{L} , is attached to a femtocell or a macrocell. The received DL signal of this user is severely affected by high interference received from the set of neighboring cells, denoted by J_u . In fact, each user $u \in \mathcal{L}$ computes its received SINR in resource block (RB), at each transmission time interval (TTI), using the following expression:

$$\gamma_{u,r} = \frac{L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}}{\sum_{j \in J_u} L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx} + \sigma_{u,r}}$$
(1)

where $\gamma_{u,r}$ is the received SINR, $L_{M,u,i(u),r}$ and $L_{M,u,j,r}$ $(j \in J_u)$ model both the propagation pathloss due to the distance and the antenna gain between the user u and its serving cell i(u) and interfering cell $j \in J_u$, respectively, $L_{S,u,i(u),r}$ and $L_{S,u,j,r}$ model the shadow fading caused by obstacles in the propagation path between the user u and its serving cell i(u)and interfering cell $j \in J_u$, respectively, and $\sigma_{u,r}$ is the power of the additive white Gaussian noise received by user u.

For the sake of simplifying notations, we adopt the two following expressions

$$P_{u,i(u),r} = L_{M,u,i(u),r} \times L_{S,u,i(u),r} \times P_{i(u),r,tx}$$

and

$$P_{u,j,r} = L_{M,u,j,r} \times L_{S,u,j,r} \times P_{j,r,tx}$$

where $P_{u,i(u),r}$ and $P_{u,j,r}$ denote the received power from the serving cell i(u) and the neighboring interfering cell $j \in J_u$, respectively. Equation (1) then reduces to:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \,.$$
(2)

III. PROPOSED SHARED-SPECTRUM DL-IC STRATEGY

In order to reduce interference and enhance the user's received SINR, the receiver of a given user u should properly cancel the received interfering signals. Consequently, the term $\sum_{j \in J_u} P_{u,j,r}$, which represents the resulting received interfering power, must be minimized. Analytically, we multiply the received interfering powers by cancellation coefficients to obtain the resulting residual interfering power $\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r}$, where $a_{u,j,r} (j \in J_u)$ are cancellation coefficients to be determined. Therefore, the post-IC SINR (i.e., resulting SINR after the IC strategy is implemented) is as follows:

$$\gamma_{u,r} = \frac{P_{u,i(u),r}}{\sum_{j \in J_u} a_{u,j,r} \times P_{u,j,r} + \sigma_{u,r}} \,. \tag{3}$$

The main purpose of the proposed shared-spectrum DL-IC strategy is to compute the optimal cancellation coefficients that optimize the user's received SINR.

In order to achieve this objective, we define for each user u a net utility function $U_{net,u}$ to be maximized. In fact, utility and cost functions were widely used in power and resources allocation algorithms, in addition to some interference alignment solutions. However, to the best of our knowledge, the utility function concept was not previously exploited in IC for HetNet. Furthermore, the utility function maximization allows the user to properly select the received interfering signals to be cancelled and to enhance its received SINR. Therefore, we use the standard definition of a utility function U_u that represents the degree of user satisfaction, and a cost function C_u which represents the cost incurred. The resulting function $U_{net,u}$ is expressed as follows:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = U_u(\gamma_u) - C_u(\gamma_u).$$
(4)

The cost function is introduced to represent the increasing computational cost incurred by a more accurate cancellation process with reduced implementation errors. Indeed, perfect cancellation [i.e. $a_{u,j,r} = 0$ $(j \in J_u)$] cannot be realized in practice. Even more, very accurate interference cancellation cannot be implemented without requesting a heavy computational burden. For each user $u \in \mathcal{L}$, we use the same following cost function:

$$C_u(\gamma_u) = \beta \gamma_u \tag{5}$$

where β is the pricing parameter to be determined.

In order to determine the optimal values for the cancellation coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$, we must compute the optimal SINR, denoted $\hat{\gamma}_u$, which maximizes the net utility function $U_{net,u}$. Therefore, we use the expression of the cost function in eq. (5) and take the derivative of eq. (4) with respect to the variable γ_u as follows:

$$U'_{u}(\hat{\gamma}_{u}) - \beta = 0 \iff \hat{\gamma}_{u} = U'^{-1}_{u}(\beta).$$
(6)

Consequently, from eqs. (3) and (6), the cancellation coefficients $a_{u,j,r}(j \in J_u)$ can be expressed as follows:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{P_{u,i(u),r}}{U'_u^{-1}(\beta)} - \sigma_{u,r} \right]$$
(7)

where j_u is the cardinality of the set of interfering cells $[j_u = Card(J_u)]$.

In the following, we define the utility functions of both the MUE and the FUE.

A. MUE utility function and IC coefficient

For each MUE $u \in \mathcal{L}_m$, we define its utility function so as to reflect its degree of satisfaction in terms of QoS as follows [10]:

$$U_{m,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} \tag{8}$$

where \mathcal{L}_m denotes the set of MUEs and α_m is a parameter that controls the steepness of the utility function. It is observed
that a higher SINR $\hat{\gamma}_u$ can be realized if $U'_{u,m}$ becomes flatter. This corresponds to choosing a small value of α_m . It should be noted that a similar utility function was proposed in [10] for a distributed power control scheme in wireless cellular systems. Maximization of the utility function there finds the optimum value of the transmission power of each user. In our work, we adopt a similar utility function form in order to calculate the optimal values for the cancellation coefficients and thereby allow proper selection of the interfering signals to be cancelled.

The function $U_{m,u}$ captures the QoS offered to user u. It is obvious that, by maximizing the utility function $U_{m,u}$, the MUE is increasingly satisfied by the received QoS. However, the cost function C_u increases by maximizing the utility function. The resulting net utility function is expressed as follows:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_m \gamma_u)} - \beta_m \gamma_u \tag{9}$$

where β_m corresponds to the parameter β of the MUE.

Consequently, using the analytical form of $\hat{\gamma}_u$ in [11], we express the cancellation coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$ of the MUE u as follows:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{\int_{u} P_{u,j,r}} \left[-\frac{\alpha_m P_{u,i(u),r}}{\ln(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1 - \sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m} - 1\right)^2 - 1})} - \sigma_{u,r} \right] \quad . \tag{10}$$

However, two necessary conditions must be verified in eq. (10). First, we have to verify that $\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m}-1\right)^2-1\geq 0$. In order to respect this condition, we must define the parameters α_m and β_m with $\alpha_m \geq 4\beta_m$. Furthermore, the second condition requires that $\frac{\alpha_m}{2\beta_m}-1-\sqrt{\left(\frac{\alpha_m}{2\beta_m}-1\right)^2-1}>0$, which is verified for $\alpha_m>4\beta_m$. In conclusion, we must minimize as much as possible the parameter α_m to maximize $\hat{\gamma}_{u,r}$ while respecting the condition $\alpha_m>4\beta_m$. Thus, we fix $\alpha_m=4.5 \ \beta_m$. Then, we aim to minimize the value of β_m that maximizes the total network throughput while enhancing the user's experience.

B. FUE utility function and IC coefficient

Similar to the MUE, for each FUE $u \in \mathcal{L}_f$, the set of FUEs, we define the following utility function $U_{f,u}$:

$$U_{f,u}(\gamma_u) = W \log\left(1 + \gamma_u\right) \tag{11}$$

where W denotes the system's bandwidth. This utility function captures the Shannon capacity for the FUE. The resulting net utility function to maximize is expressed as follows:

$$U_{net,u}(\gamma_u) = W \log (1 + \gamma_u) - \beta_f \gamma_u \tag{12}$$

where β_f corresponds to the parameter β of the FUE. By maximizing the net utility function $U_{net,u}$, the FUE attempts to enhance its throughput, taking into account the incurred price. Using this utility function and eq. (7), we express the coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$ for a FUE $u \in \mathcal{L}_f$ as follows:

$$a_{u,j,r} = \frac{1}{j_u P_{u,j,r}} \left[\frac{\beta_f}{W - \beta_f} P_{u,i(u),r} - \sigma_{u,r} \right].$$
(13)

The proposed DL-IC strategy is summarized in Table I.

Table I SUMMARY OF DL-IC STRATEGY

For each TTI
For each RB r
1- Each user $u \in \mathcal{L}$ measures $P_{u,i(u),r}$, $P_{u,j,r}$ for $j \in J_u$
and $\sigma_{u,r}$.
2- If
a- MUE : computes the coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$
using eq. (10)
b- FUE : computes the coefficients $a_{u,j,r}$ $(j \in J_u)$
using eq. (13)
3- The user computes the post-IC SINR using eq. (3)
end
end

C. Implementation issues

The DL-IC strategy proposed in this paper requires a limited amount of measurement reports exchange. In fact, the UE and its serving cell cooperate to build the neighboring cells list, and estimate the path loss between it and its neighboring cells. Moreover, the MUE and its serving macro cell exchange measurement reports to update the list of neighboring cells. The UE receiver is then able to estimate the channel gain exploiting the pilot channels received from these cells and compute the received power from them. However, in the case of FUE, the serving femtocell requires an additional DL receiver to measure the signal from the surrounding base stations. This receiver is called "HeNB sniffer". The femtocell uses this receiver to measure the co-channel reference signal received power (RSRP) to determine the coverage of surrounding cells. The RSRPs of surrounding base stations are measured also by the FUE and reported to the serving femtocell. Else, the femtocell measures the reference signal transmission power (RSTP) of neighboring cells and estimates the path loss from attached FUE to the neighboring macrocells and femtocells.

Furthermore, the cancellation process is more and more complex by increasing the number of interfering signals to cancel, called cancellation constraints. In fact, the number of cancellation constraints reflects the implementation complexity of the proposed strategy. Hence, to further limit the computational cost increase in additional support to the effect to the proposed utility functions, we set an upper bound that restricts the number of cancellation constraints. Indeed, the cancellation process is not applied for interfering signals corresponding to cancellation coefficients superior to a pre-defined upper bound, denoted A_u (i.e., if $a_{u,j,r} > A_u$, $a_{u,j,r} = 1$). Likewise, we define a second strategy of cancellation constraints selection. This strategy consists simply in cancelling a pre-fixed number, N_c , of interfering signals having the lowest cancellation coefficients. Consequently, the UE cancels at most N_c received interfering signals. Then, our DL-IC strategy's performance and complexity will both depend on N_c . Furthermore, we define a lower bound, denoted A_l , that reflects the cancellation precision. In fact, imperfections due to channel estimation and signals' reconstruction make it impossible to perform a perfect cancellation of the interfering signals at the requested cancellation ratio or coefficient $a_{u,i,r}$. Therefore, A_l represents the minimum suppression ratio achievable due to IC implementation imperfections or

Parameters	Macrocell	Femtocell
System	2 GHz	
Swetzen handwith		
System bandwith	5 MHz (shared)	
Cell layout	of 7 cells, 3 sectors per cell	circular cell, 1 sector per cell
Cell size	250 m	20 m
Antenna gain pattern	TS 36.942	Omnidirectionnal
Max antenna gain	15 dBi	0 dBi
Max Tx power	43 dBm	20 dBm
UE receiver noise figure	9 dB	9dB
Thermal noise level	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
Pathloss model	Cost 231 urban macro	Indoor Hotspot
Initial number of UEs	25 UEs	1 UE
UEs speed	30 Km/h	3 Km/h
Schedular	Proportional Fair	
Simulation time in TTIs	1000	
Proposed DL-IC strategy parameters	$\alpha_m = 4.5 \ \beta_m$	W = 5 MHz $\beta_f = 10^4 \text{ [11]}$

Table II SIMULATION PARAMETERS

the minimum value that a cancellation coefficient can take [i.e., $a_{u,j,r} = \max(A_l, a_{u,j,r})$].

IV. SIMULATION RESULTS AND ANALYSIS

In order to evaluate the efficiency of the proposed DL-IC strategy and its impact on network and user performances, we used an LTE network system-level simulator. This simulator generates an area of interest (ROI) composed by 7 hexagonal macrocells. Depending on the simulation scenario, it randomly populates this ROI by femtocell sites up to a requested number of femtocells per macrocell on average. The MUEs are randomly deployed inside each macrocell sector. Each FUE is initially attached to a femtocell. However, during the simulation, each UE can request handover, if necessary, to the cell offering best coverage. The simulation parameters are summarized in Table II.

We have earlier mentioned that the performance of the DL-IC strategy depends on its tuning, mainly the parameter β_m . In Fig. 1, we simulate the network performance and plot throughput gains for different values of β_m . The obtained results confirm what has been analyzed analytically in section III. In fact, the smaller is the parameter β_m , more significant is the obtained throughput gain. However, this gain cannot be limitlessly enhanced. Actually, simulation results suggest a throughput gain saturation for values of β_m lower than 10^{-3} . Hence, we set in the following simulations the parameter β_m to 10^{-3} . Results of Fig. 1 suggest that throughput gains against a homogenous network witout IC are as much as 200% plus an extra 98% per additional femtocell site.

As mentionned previously in section III, IC implementation is complex in practice. Thus, we simulate the throughput gains for different values of the upper bound A_u . By reducing the



Figure 1. Network throughput gains for different values of β_m $(A_u = 1; A_l = 0)$.

value of A_u , we reduce the number of interfering signals selected for IC thereby reducing implementation complexity. In Fig. 2, we plot the CDF function of the number of interfering signals to be cancelled for different values of A_u to confirm that the number of cancellation constraints indeed reduces with lower values of A_u . Results of Fig. 3 suggest that as long as A_u is larger than 10^{-2} , there is no performance deterioration compared to perfect IC ($A_u = 1$). For $A_u = 10^{-2}$, the throughput gains against a homogenous LTE network without IC are very significant in the range of 133% plus an extra 85% per additional femtocell site. Compared to a basic HetNet without IC, these gains are still very promising in the range of 133% plus an extra 35% per additional femtocell site. Hence, we set in following simulations the value of A_u to 10^{-2} .



Figure 3. Network throughput gains against a homogeneous LTE network for different values of A_u ($\beta_m = 10^{-3}$; $A_l = 0$).



Figure 2. CDF of the number of cancelled interfering signals for different numbers of femtos and different values of A_u .

In Fig. 4, we plot now the throughput gain curves for different values of A_l which represents the lowest cancellation ratio due to practical imperfections of IC implementation. They suggest that setting in the following simulations A_l to a maximum practical IC ratio value of 10^{-2} (i.e., -20 dB) results in quite significant throughput gains against a homogenous LTE network without IC, i.e., in the range of 166% plus an extra 78% per additional femtocell site. Compared to a basic HetNet without IC, these gains are still high in the range of 166% plus an extra 28% per additional femtocell site.

In Fig. 5, we evaluate the impact of selecting a fixed number (N_c) of interfering signals to be cancelled on the proposed DL-IC strategy and hence plot the throughput gains for different values of N_c . Results there suggest that limiting the proposed DL-IC to only $N_c = 4$ interfering signals having the lowest cancellation coefficients or ratios results in throughput gains against an LTE homogenous network without IC in the range of 150% plus an extra 70% per additional femtocell site. Compared to a basic HetNet without IC, these gains are still high in the range of 150% plus an extra 20% per additional femtocell site.

In order to further evaluate our DL-IC strategy, now that the proposed DL-IC strategy has been optimized both in throughput performance and implementation cost against a basic HetNet setting without IC, we consider as a benchmark for performance comparisons, the dynamic DL power control



Figure 4. Network throughput gains against a homogeneous LTE network for different values of A_l ($\beta_m = 10^{-3}$).

(DL-PC) algorithm for LTE HetNet proposed in [12]. This algorithm aims to reduce interference impact on the users' received SINR by adjusting the transmission power of femtocells



Figure 5. Network throughput gains against a homogeneous LTE network for different values of N_c ($\beta_m = 10^{-3}$; $A_l = 10^{-2}$).

to a level comprised between a minimum transmission power P_{min} and a maxmimum transmission power P_{max} . The basic concept of the dynamic DL-PC algorithm is summarized as follows [12]:

$$P_{DL} = max \left(P_{min}, min \left(P_{max}, P_0 + P_{offset} \right) \right) \quad (14)$$

where P_{DL} denotes the transmission power of the femtocell, P_0 represents the received interference measured by the FUE attached to this femtocell and P_{offset} is based on the pathloss between this femtocell and its attached FUE [12]. The values of P_{min} and P_{max} are set, respectively, to -10 dBm and 20 dBm.



Figure 6. Total network throughputs ($\beta_m = 10^{-3}$).

In Fig. 6, we plot the total network throughputs achieved by our DL-IC strategy (with different setups) and by DL-PC



Figure 7. Network throughput gains against a homogeneous LTE network $(\beta_m = 10^{-3})$.

[12] and translate them in throughout gains in Fig. 7. We observe that DL-PC offers only a modest throughput gain of about 2% per additional femocell site against basic HetNet. In contrast, both proposed DL-IC versions - optimized in terms of performance vs. complexity tradeoff - offer much more significant gains, about the same, and sitting only almost halfway from the potential maximum gains achievable with perfect IC implementation.



Figure 8. Network throughput gains against a basic LTE HetNet without IC $(\beta_m = 10^{-3})$.

V. CONCLUSIONS

In this paper we proposed a shared-spectrum DL-IC strategy that permits an LTE HetNet receiver to eliminate the most severe interference received from neighboring cells, both macro and femto. The propo sed strategy is based on utility functions not yet exploited for IC in HetNet, to the best of our knowledge. These functions permit to relax cancellation coefficients in order to reduce the implementation complexity and compute the optimal cancellation coefficients values for each interfering signal in order to enhance SINR, QoS and throughput. We prove by system-level simulations that the suggested shared-spectrum DL-IC strategy is able to improve the LTE HetNet network throughput and to enhance the users' received SINRs. In fact, throughput gains achievable by the new shared-spectrum DL-IC strategy can reach as much as 200% against a homogeneous LTE network without IC along with an extra 48% per additional femtocell base station in a basic LTE HetNet without IC.

REFERENCES

- [1] ITU, "World telecommunication ICT indicators database," Geneva, June 2012.
- [2] K. J. L. F. S. Landstrom, A. Furuskar and F. Kronestedt, "Heterogeneous networks : increasing cellular capacity," Ericsson, Tech. Rep., 2011.
- [3] 3GPP, "TR 36.814 v9.0.0 evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects (Release 9)," Tech. Rep., March 2010.
- [4] N. Saquib, E. Hossain, L. B. Le, and D. I. Kim, "Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 86–95, June 2012.

- [5] A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei, T. Ji, T. Luo, M. Vajapeyam, T. Yoo, O. Song, and D. Malladi, "A survey on 3GPP heterogeneous networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 10–21, June 2011.
- [6] V. Chandrasekhar, J. Andrews, T. Muharemovic, Z. Shen, and A. Gatherer, "Power control in two-tier femtocell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 4316–4328, August 2009.
- [7] D.-C. Oh, H.-C. Lee, and Y.-H. Lee, "Power control and beamforming for femtocells in the presence of channel uncertainty," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2545 –2554, July 2011.
- [8] C. Suh, M. Ho, and D. Tse, "Downlink interference alignment," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 9, pp. 2616 –2626, September 2011.
- [9] N.-D. Dao, J. Soler-Garrido, R. Cepeda, Y. Sun, and W. H. Chin, "Design and evaluation of antenna selection methods for interference rejection combining," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 8, pp. 2751 –2759, August 2012.
- [10] M. Xiao, N. Shroff, and E. Chong, "A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 11, no. 2, pp. 210 – 221, April 2003.
- [11] D. T. Ngo, L. B. Le, T. Le-Ngoc, E. Hossain, and D. I. Kim, "Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 3, pp. 979 –989, March 2012.
- [12] L. Yang and P. Wen, "Location based autonomous power control for ICIC in LTE-A heterogeneous networks," in *Proc. GLOBECOM 2011.*

R. Nasri, E. Rakotomanana, S. Affes , and A. Stéphenne, "On the Evaluation of the LTE-Advanced Proposal within the Canadian Evaluation Group (CEG) Initiative: Preliminary Work Results", Proc. of 25th Biennial Symposium on Communications, Queen's University, Kingston, ON, Canada, May 12-14, 2010.

ON THE EVALUATION OF THE LTE-ADVANCED PROPOSAL WITHIN THE CANADIAN EVALUATION GROUP (CEG) INITIATIVE: PRELIMINARY WORK RESULTS

Raouia Nasri, Edenalisoa Rakotomanana, Sofiène Affes, and Alex Stéphenne

INRS-ÉMT, Université du Québec, Montréal, QC, Canada

ABSTRACT

In this paper, we present a preliminary work within the CEG to evaluate the LTE-advanced proposal as a candidate for further improvements of LTE earlier releases. We consider an open-source LTE simulator that implements most of the LTE features. We focus on channel state variations and related link adaptation. We study the performance of channel quality report to the transmitter to track the downlink time-frequency channel variations among users. This process aims at performing link adaptation. To insure this procedure, we implement a CQI feedback scheme to an LTE open-source simulator. SINRs per subcarriers are computed supposing a perfect channel knowledge then mapped into a single SINR value for the whole bandwidth. This SINR is represented by a CQI value that allows for dynamic MCS allocation. CQI mapping is evaluated through different SINR mapping schemes.

1. INTRODUCTION

Recent wireless systems should satisfy the requirements for high peak data rates and high bandwidth efficiency. The 3^{rd} Generation Partnership Project (3GPP) has specified the key technologies to achieve such requirements [1]. LTE for Long Term Evolution is being finalized in 3GPP by defining the new requirements and targets for data rate, system capacity, spectrum efficiency and latency. Based on these requirements, 3GPP LTE has defined the key features to reach such goals.

The 3GPP standardization of LTE is nearing completion leading to start a new study to seek a candidate for further technology enhancement. LTE-advanced is the successor to LTE systems that is targeted to meet the IMT-Advanced requirements keeping the compatibility with LTE Release 8 (IMT for International Mobile Telecommunications). LTE-Advanced aims at improving the performance of the existing release to reach and surpass the requirements of IMT-Advanced based on technologies already supported by earlier releases. In this context, the CEG is operating under the auspices of the ITU Canadian National Organisation (CNO) to evaluate candidate Radio Transmission Technologies (RTTs) and radio interface proposals. Manufacturers, service providers, universities and research institutions are participating in the CEG project. This study is a preliminary work, in the particular context of the CEG initiative, on the evaluation of LTE-Advanced systems which are a successor of LTE systems.

LTE-Advanced technologies support flexible bandwidth deployments and are multicarrier-based technologies for the deployment of 4G systems [2]. Orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) and multiple-input multiple-output (MIMO) technologies are the retained candidates in LTE systems for downlink transmissions to mitigate the inter-symbol interference and to cope with the multipath fading problems [3]. The single-carrier frequency division multiple access (SC-FDMA) is used on the uplink.

The flexible nature of the LTE structure allows for adaptive and sharing techniques. On one hand, the sharing resource structure of OFDM-based systems allows for the deployment of scheduling techniques. On the other hand, in LTE the access scheme presents a two-dimensional resource sharing structure with time and frequency dimensions [4]. A scheduling technique should satisfy the following trade-off: maximizing the system throughput and enhancing the spectral efficiency while insuring a fair behavior towards users by meeting the target data rates. Furthermore, the multicarrier nature of the access scheme allows to track the channel variation over time and frequency dimensions. Hence, we talk about advanced radio resource management (RRM) functions [5]. These functions are mainly hybrid automatic repeat request (HARQ), link adaptation (LA) and channel state report. The HARQ process aims at retransmitting the erroneous packets and keeping a minimum radio interface delay.

The channel quality, measured in terms of channel quality indicator (CQI), is utilized to report the channel variation among users and perform LA. In fact the CQI maps the channel state from indirect metrics such as bit error rate (BER) and signalto-noise and interference ratio (SINR) [6]. The performance of the LA mechanism depends on the quantifying process that computes the CQI values. In the literature, many mapping schemes were studied.

We consider here LA through the feedback of the CQI computed at the receiver to adjust the transmission parameters to the link variation over time seen differently by each user. To do so, we give in the next section a brief overview of LTE systems and the used LTE simulator to develop our approach. In section 3, we state the CQI mapping schemes and the method applied in our work. Numerical results are shown in section 4. Section 5 draws out some concluding remarks and perspectives.

2. OVERVIEW OF THE LTE SIMULATOR

2.1. LTE specification: requirements and components

LTE is considered as a flexible radio interface that increases the spectrum efficiency with high data rates at low costs [7]. The starting point of LTE study was the definition of requirements and then targets. The key features of LTE to achieve these requirements are the multiple access schemes, adaptive modulation and coding (AMC), multi-antenna techniques, hybrid automatic repeat request and radio resource allocation. The core transmission scheme in LTE is OFDM where data is transmitted over a large number of parallel narrow-band subcarriers. OFDM is selected due to its robustness to multipath propagation problems and its flexibility to support frequency diversity. For each transmission over a single subcarrier or group of subcarriers, a modulation and coding scheme (MCS) is applied to perform LA through AMC.

2.2. LTE resource structure

For LTE, the access scheme is OFDMA whith its two-dimensional resource sharing structure over time and frequency. The time dimension is described as a transmission time interval (TTI) corresponding to one subframe of 1ms composed of 2 slots of 0.5 ms each. The frequency dimension, known as a chunk, is composed of 12 OFDM subcarriers. In other words a chunk describes a resource block of 6 or 7 OFDM symbols, depending on wether the cyclic prefix (CP) is normal or extended, respectively. Each RB is composed of resource elements (REs) each formed by one subcarrier and one OFDM symbol.

2.3. LTE simulator

In our work, we used the LTE open-source simulator proposed in [8] combined with simulation tools developed by INRS over a span of 15 years.

The simulator operates in three scenarios: the single-cell downlink, the single-cell multi-user and the multi-cell multi-user. For the single-cell downlink scenario, only the link between one user and one base station is considered. In this scenario, the following features are treated: channel estimation, channel tracking, channel prediction, adaptive modulation and coding (AMC) feedback, physical layer modeling, channel coding, MIMO schemes, signal generation and channel model.

The link-level simulator models the downlink shared channel (DL-SCH). A time-frequency grid is considered to perform multiple access and resource allocation. Each element in the grid consists of one OFDM subcarrier during one OFDM symbol. One resource block is composed of 6 to 7 OFDM symbols. To encode users, a turbo encoder is used for each user's data then each encoded block is interleaved based on quadrature permutation polynomial (QPP). The HARQ process is also considered with rate matching. The simulator can support different diversity schemes, different bandwidth sizes, different channel models and scheduling methods. For scheduling, only round robin is implemented. Proportional fair, adaptive allocation and dynamic MCS assignment are not yet implemented.

3. PROPOSED APPROACH FOR LINK ADAPTATION

3.1. Channel quality mapping

The link adaptation process consists in choosing the appropriate MCS under the current channel conditions for each user. On a particular realization, the channel state is reflected by the BER or the SINR. However, these metrics can not be directly transmitted, so they should be mapped into an accessible measure which is the CQI. In the state of the art, many SINR-to-CQI mapping (respectively BER-to-CQI mapping) are introduced. Some CQI forms are performed supposing a perfect knowledge of the direct metric. In other cases, an error estimation is considered to estimate a more realistic CQI.

3.2. Proposed CQI feedback scheme

The LTE simulator described above is suitable to include many features of LTE systems. In this work, we consider the channel quality feedback and then the link adaptation.

For the moment, the CQI is computed at the channel generation level, which means that the CQI is calculated based on perfect channel knowledge.

The starting point consists of SINR calculation for all the available subcarriers when the channel is generated at the link level. SINR calculation depends on the type of the channel, the fading and the mulitple access scheme. Yet, only block fading is considered in this paper.

The proposed CQI calculation is processed as follows:

- 1. First, the SINR is computed per carrier for all the available subcarriers over the bandwidth, and hence we obtain a vector of SINRs,
- 2. Then, we map the obtained vector of SINRs to a single value to get an effective SINR. The effective SINR is computed using one of the three proposed methods in the literature. These methods are mainly, linear, geometric and exponential mapping.
 - the linear effective SINR is given as follows:

$$SINR = \frac{1}{N_{subcarriers}} \sum_{i=1}^{N_{subcarriers}} SINR_i,$$

- the geometric effective SINR is as computed as:

$$SINR = exp(\frac{1}{N_{subcarriers}} \sum_{i=1}^{N_{subcarriers}} ln(SINR_i)),$$

- the exponential SINR is defined in [9]:

$$SINR = -\beta ln(\frac{1}{N_{subcarriers}} \sum_{i=1}^{N_{subcarriers}} exp(\frac{-SINR_i}{\beta})).$$

 $SINR_i$ is the per subcarrier SINR and β is a scaling factor that depends on the MCS.

- 3. Once we get the effective SINR, we map it to a CQI value that translates the channel state for each user.
- 4. Finally, the obtained CQI is fed back to the transmitter to identify the equivalent parameters for the following transmission.

This process is executed periodically to track the channel variations. In this way, we could perform the link adaptation by setting the MCS based on the previous channel state and then adjust the current transmission parameters to the channel variations over time for each user.

4. NUMERICAL RESULTS

To evaluate the performance of the proposed SINR-to-CQI mapping scheme, some simulations were conducted and LA is performed for block fading channels.

4.1. Simulation environment

To conduct simulations over a single-input single-output scenario (SISO), the same parameters detailed in [8] are used over a Pedestrian A channel model. The scheduling scheme is based on round robin resource allocation. The dynamic MCS allocation is performed through CQI report to the transmitter. First, SINRs per subcarrier were collected then mapped to an effective SINR value as described above. Then, the corresponding CQI value is computed reflecting the channel state and reported to the transmitter. Finally, the transmitter adjusts the MCS regarding the received CQI from the previous iteration.

Since the channel used in these simulations is a block fading channel, it is supposed to be constant during one TTI interval. For this reason, the SINRs per subcarrier are computed over a period of 1 TTI corresponding to 7 OFDM symbols for a normal cyclic prefix.

Here, the CQI is computed periodically each 4 subframes corresponding to 2 TTIs to give one CQI report over the whole available subcarriers. The choice of the reporting period of 2 TTIs instead of 1 TTI aims at reducing the payload related to the CQI feedback in the case of block fading channels.



Fig. 1. CQI distribution over time for different SNRs.

4.2. Simulation results

Matlab-based simulations were conducted to study the performance of the system with CQI feedback. During simulation, the channel presents different conditions and so different SINR per subcarriers. The effective SINR is then changing which leads to different CQI values. In our simulations, the different measured effective SINRs are mapped to different CQIs which allows the transmitter to adjust the MCS regarding the received CQI. Fig. 1 illustrates the CQI variations over time when the input SNR is equal to -5 dB, 5 dB and 25 dB and the EESM (Effective Exponential SINR Mapping) is applied.

We compare our CQI feedback-based LA scheme with the case where no CQI feedback is conducted. To do so, we run simulations over a Pedestrian A (PedA) channel with a constant CQI value equal to 4 corresponding to a QPSK modulation. This case corresponds to static MCS during the whole transmission independently of the channel conditions over time. For the dynamic scheme, we consider the EESM to map subcarrier SINRs to a single SINR value over the whole bandwidth.

We represent the system performance in terms of BER and throughput variation per cell. In Fig. 2, we show the performance of the system when the CQI is illustrating the channel variations (dynamic CQI). We notice that the BER is still under 10^{-1} . The performance is worse than the case when the CQI is maintained to 4.

If we translate these results to CQI variations shown in Fig. 1, we can predict this behavior. In fact, for low SNR input, the CQIs are small leading to low BERs. For SNR = -5 dB, the CQIs are less than 5 which approaches the BER given by a constant CQI= 4. However, for high SNR input, the CQIs are high, hence giving high BER values as can be noticed for an SNR input of 25 dB giving CQI values greater than 7 corresponding to higher-order modulation and higher BER compared to a lower-order modulation as when CQI= 4.

Considering the perviously described behavior, the perfor-



Fig. 2. BER: dynamic CQI feedback and fixed CQI scheme.

mance in terms of throughput is enhanced when using dynamic CQI metric, and hence MCS. We notice an improvement in the overall cell throughput when the channel variations are tracked. This result is shown in Fig. 3.

The three SINR mapping schemes give almost the same results. We opt for the EESM since it introduces a MCS depending factor. This is shown in Fig. 4.

5. CONCLUSION

In this paper, we gave an overview of LTE systems and the main features to achieve the target requirements. This work is stated within the initiative of the CEG to evaluate the proposal of the LTE-based candidate to reach the requirements of IMT-Advanced systems. We showed preliminary results of the implementation of the LTE-Advanced features. We presented a dynamic modulation and coding allocation scheme and performed channel quality feedback to the receiver to support link adaptation. To do so, we used an open-source LTE simulator that implements most features of LTE systems. Three SINR mapping schemes were introduced into the LTE simulator, linear, geometric and exponential mapping. Then we compared the system performance using with LA to the case without LA. This work will be followed by considering the IEEE proposal as a candidate for further enhancement of LTE technologies. Both technologies, 3GPP and IEEE, will be compared through link and system-level simulations considering several environments as required by the CEG.



Fig. 3. Cell throughput of a dynamic CQI feedback and a fixed CQI scheme.



Fig. 4. Cell BER of the 3 mapping schemes.

6. REFERENCES

- S. Parkval, and D Astley, "The Evolution of LTE towards IMT-Advanced," *Journal of Communications*, vol. 4, no. 3, April 2009.
- G. Bauch, and G. Dietl, "Multi-User MIMO for Achieving IMT-Advanced Requirements," International Conference on Telecommunications, pp. 1-7, 16-19 June 2008.
- [3] D. Molteni, and M. Nicoli, "Interference Mitigation in Multicell LTE Systems: Performance over Corrected Fading Channels," *IEEE 10th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, pp. 25-28, Aug. 2008.
- [4] M. Assaad, and A. Mourad, "New Frequency-Time Scheduling Algorithms for 3GPP/LTE-like OFDMA Air Interface in the Downlink," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 1964-1969, May 2008.
- [5] N. Kolehmainen, J. Puttonen, P. Kela, T. Ristaniemi, T. Henttonen, and M. Moisio, "Channel Quality Indication Reporting Schemes for UTRAN Long Term Evolution Downlink," *IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2522-2526, May 2008.
- [6] A. M. Mourad, L. Brunel, A. Okazaki, and U. Salim, "Channel Quality Indicator Estimation for OFDMA Systems in the Downlink," *IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, pp. 1771-1775, April 2007.
- [7] D. Astély, E. Dahlman, A. Furuskär, Y. Jading, M. Lindstrm, and S. Parkvall, "LTE: The Evolution of Mobile Broadband [LTE part II: 3GPP release 8]," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 44-51, April 2009.
- [8] C. Mehlführer, M. Wrulich, J. C. Ikuno, D. Bosanska, and M. Rupp, "Simulating The Long Term Evolution Physical Layer," Procedure of the 17th European Signal Processing Conference, August 2009.
- [9] E. Tuomaala, and H. Wang, "Effective SINR Approach of Link to System Mapping in OFDM/Multi-carrier Mobile Network," 2nd International Conference on Mobile Technology, Applications and Systems, 2005.